VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ

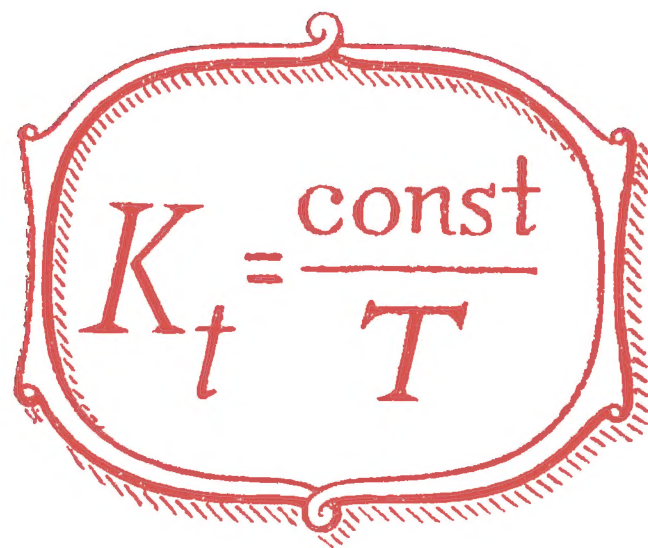


ПЬЕР КЮРИ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

ПЕРЕВОД С ФРАНЦУЗСКОГО
Н. Н. АНДРЕЕВА, И. Г. РУСАКОВА,
К. Н. ШАПОШНИКОВА и Л. С. САЗОНОВА

РЕДАКЦИЯ И ПРИМЕЧАНИЯ
Н. Н. АНДРЕЕВА и Л. С. САЗОНОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА · ЛЕНИНГРАД
1966

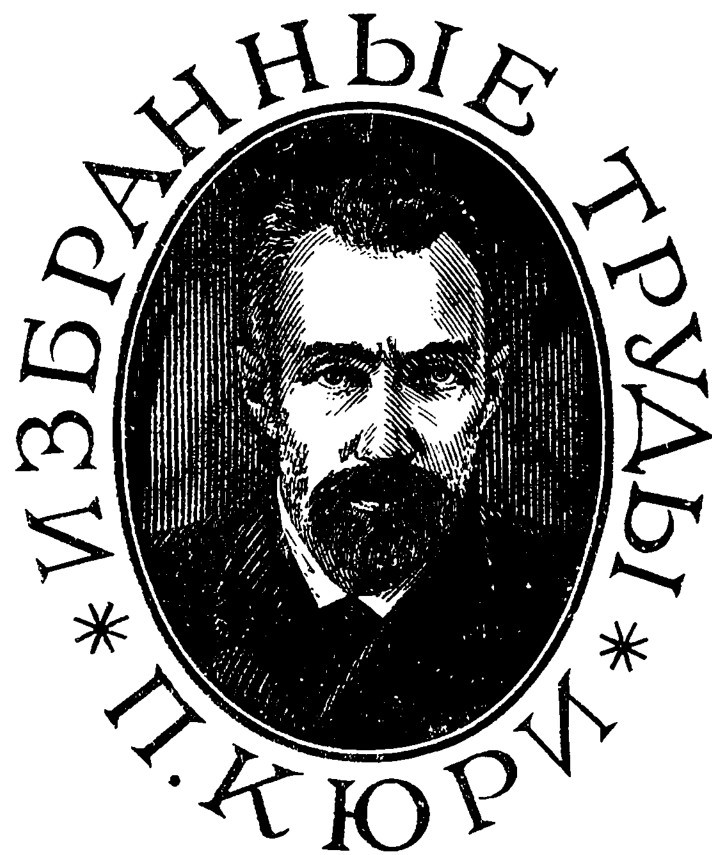
СЕРИЯ «КЛАССИКИ НАУКИ»

Основана академиком *С. И. Вавиловым*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

академик *И. Г. Петровский* (председатель), академик *А. А. Имшенецкий*, академик *Б. А. Казанский*, член-корреспондент АН СССР *Б. Н. Делоне*, член-корреспондент АН СССР *Б. М. Кедров*, профессор *И. В. Кузнецов* (зам. председателя), профессор *А. В. Лебединский*, *Д. Д. Ознобишин* (ученый секретарь), профессор *Ф. А. Петровский*, профессор *Л. С. Полак*, профессор *Н. А. Фигуровский*, профессор *И. И. Шафрановский*

2-3-7
130-65 (доп.)


ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ
П. КЮРИ

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСТВО



I

ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ В ГЕМИЭДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ С КОСЫМИ ГРАНЯМИ [1] *

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ) [2]

1. Кристаллы с одной или несколькими осями, концы которых несходны, т. е. гемиэдрические кристаллы с косыми гранями, обладают особым физическим свойством: они порождают два электрических полюса противоположного знака на концах указанных осей при изменении их температуры; это явление известно под названием *пироэлектричества*. Мы нашли новый способ образования полярного электричества в тех же самых кристаллах. Этот способ состоит в том, что последние подвергают переменному давлению в направлении их осей гемиэдрии.[1]

Возникающие при этом явления совершенно аналогичны тем, которые вызываются нагреванием; при сжатии концы осей, к которым приложено давление, заряжаются электричеством противоположных знаков; если затем убрать сперва заряды, а после этого устранить сжатие, то явление воспроизводится вновь, но с переменой знаков зарядов: тот конец кристалла, который при сжатии заряжался положительно, теперь оказывается заряженным отрицательно и наоборот.[2]

Для проведения опыта мы вырезали пластинку из изучаемого материала, две плоскости которой делали параллельными между собой и перпендикулярными одной из гемиэдрических осей. Эти плоскости были покрыты листочками оловянной фольги, изолированными снаружи пла-

---

* Цифры в квадратных скобках — ссылки на примечания в конце книги (*Ред.*).

[1] Bull. de la Soc. minéral., 90, 1880.

[2] Гемиэдрические кристаллы с косыми гранями суть единственные пироэлектрические кристаллы; только они способны создавать полярное электричество под действием давления. Некоторые голоэдрические кристаллы, как например известковый шпат, также заряжаются под давлением, но только электричеством одного знака; в этом случае имеет место совершенно иное — поверхностное явление. В условиях наших опытов его влияние было совершенно неощутимо.

стинками твердого каучука; все это зажималось в тиски. Таким образом можно было производить давление на обе пластинки как раз в направлении гемиэдрической оси. Чтобы убедиться в образовании электричества, мы применяли электрометр Томсона. Можно было выявить разность напряжений на концах, соединяя каждый из оловянных листков с парами секторов прибора, стрелка которого заряжалась электричеством известного знака.

Можно также измерить каждый заряд в отдельности, для чего достаточно присоединить один из оловянных листочков к земле, а другой — к стрелке, а пары секторов зарядить от батареи. Не приступая еще к изучению законов, управляющих этим явлением, мы можем утверждать, что его характер такой же, как и характер явления пироэлектричества, который и исследовал Гоген в своей замечательной работе о турмалине [3].

2. Мы провели сравнительное изучение обоих видов образования полярного электричества на ряде непроводящих гемиэдрических веществ с косыми гранями; в этот ряд входят почти все вещества, которые известны как вещества пироэлектрические.[3]

Влияние нагревания исследовалось по методике Фриделя, оказавшейся очень удобной.[4] Наши опыты были проведены с цинковой обманкой, хлорноватокислым натрием, борацитом, турмалином, кварцем, каламином, топазом, правой виннокаменной кислотой, сахаром и сегнетовой солью.

У всех этих кристаллов вызванные сжатием явления по направлению такие же, как при охлаждении; при снятии сжатия явления имеют такое же направление, как и при нагревании.

Тут имеется очевидная связь, которая позволяет в обоих случаях отнести явления к одной и той же причине и объединить их следующим утверждением:

Какова бы ни была причина, всякий раз, когда гемиэдрический непроводящий кристалл с косыми гранями сжимается, возникает электрическая поляризация определенного направления; всякий раз, когда этот кристалл растягивается, выделение электричества происходит в противоположном направлении. Если этот взгляд верен, то явления, создаваемые сжатием, должны иметь такое же направление, как и те, которые обусловлены нагреванием в веществах, обладающих отрицательным коэффициентом расширения вдоль гемиэдрической оси.[5]



[3] Можно предполагать, что существует еще много других искусственных кристаллических веществ. Например, среди активных в отношении поляризованного света кристаллов имеются такие, некоторые оси которых обладают несхожими между собой концами.

[4] Bull. de la Soc. minéral., 1879 [4].

[5] Эта работа выполнена в Минералогической лаборатории Факультета наук.

II

О ПОЛЯРНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ В ГЕМИЭДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ С КОСЫМИ ГРАНЯМИ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

1. На предпоследнем заседании мы представили Академии описание одного нового способа получения полярного электричества в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями; мы показали, что во всех известных случаях существует некоторое постоянное соответствие между направлением явлений, производимых изменениями температуры, и направлением явлений, производимых изменениями давления, — соответствие, которое позволило сформулировать следующее общее заключение: какова бы ни была вызывающая явление причина, каждый раз, когда какой-нибудь гемиэдрический кристалл с косыми гранями сжимается, возникают электрические полюсы определенного направления, и каждый раз, когда такой кристалл растягивается, возникают электрические полюсы противоположного направления.

Мы покажем теперь, что во всех исследованных непроводящих веществах эти направления связаны с положением гемиэдрических граней. С этой целью мы дадим обзор пироэлектрических кристаллов, указав особенности каждого, а также расположение электрических полюсов. Результаты, приводимые в нижеследующем перечне, в большинстве случаев принадлежат не нам и были уже давно известны, но их необходимо напомнить, чтобы отчетливо связать между собой все известные факты.

2. Кубическая система. Гемиэдрические кристаллы с косыми гранями, относящиеся к этой системе, имеют четыре гемиэдрические оси, которые представляют собой четыре тройных оси куба; эти же направления одновременно представляют собой оси электрической поляризации.

Цинковая обманка (Фридель). Гемиэдрическая форма — тетраэдр; у одного небольшого тетраэдра мы нашли, что положительный полюс при

сжатии расположен у вершины, отрицательный полюс при сжатии находится у основания.

Хлорноватокислый натрий. К нему применимо сказанное только что для цинковой обманки.

Гельвин. То же, что и для цинковой обманки. У этого минерала мы смогли исследовать только действие нагревания и только со стороны основания; эти кристаллы были вкраплены в свою жильную породу и потому не могли быть исследованы на сжатие.

Гексагональная система. *Турмалин.* Главная ось есть ось гемиэдрии и одновременно ось полярного электричества; один из концов оканчивается тупым ромбоэдром b^1 [2]; другой — острым ромбоэдром e^1; при сжатии положительный полюс образуется со стороны вершины e^1 (Гаюи).

Кварц. Гемиэдрическая форма с косыми гранями — дитриэдр; он имеет три горизонтальных гемиэдрических оси, направленные от одного ребра гексагональной призмы к противоположному ребру. Если рассечь дитриэдр горизонтальной плоскостью, то сечение представит собой равносторонний треугольник; три его высоты суть три оси полярного электричества, совпадающие, таким образом, с осями гемиэдрии; положительный полюс при сжатии располагается со стороны вершины треугольника, а отрицательный полюс — со стороны основания (Фридель).

Орторомбическая система. *Топаз* (Фридель). Вертикальная ось есть ось гемиэдрии и вместе с тем ось полярного электричества. У одного кристалла на одном из концов были грани e^1 и a^1 (иногда гемиэдрические), которые хорошо проявлялись, тогда как на другом конце они были едва заметны; кроме того, этот последний конец был гладким и блестел; первый же был шероховатым и тусклым. Мы могли установить, что положительный полюс при сжатии расположен со стороны той вершины, где грани e^1 и a^1 проявляются сильнее; однако, чтобы можно было окончательно установить направление этого явления, опыт нужно было бы повторить с кристаллами действительно гемиэдрическими; к сожалению, такие кристаллы редки.

Каламин. Вертикальная ось есть ось гемиэдрии и одновременно ось полярного электричества. Один из концов образован основанием p и гемиэдрическими гранями a^1 и e^1; другой конец образован острым октаэдром e_3; при сжатии положительный полюс возникает у этой последней вершины (Гаюи).

Сегнетова соль. Обычная гемиэдрическая форма — это тетраэдр $b^{1/2}$; оси полярного электричества направлены от одной из вершин этого тетраэдра к противоположному основанию; таким образом они не совпадают ни с одной из кристаллографических осей; что касается их точного направления, то это мы еще не могли установить; указать их на основе теоретических соображений нам не удалось, так как тетраэдр был несовершенным, а их экспериментальное определение потребовало бы целого ряда очень

точных измерений количества электричества, образующегося вдоль близких направлений; это, впрочем, несущественно для интересующего нас вопроса; достаточно знать, что эта ось идет от вершины к одной из точек основания тетраэдра; при сжатии положительный полюс образуется у этой вершины.

Клиноромбическая система. *Правая винная кислота.* Горизонтальная ось есть ось гемиэдрии и одновременно ось полярного электричества. Грани e^1 имеются у одного конца и отсутствуют у другого; положительный полюс образуется при сжатии с той стороны, где находятся гемиэдрические грани (Ханкель).

Сахар. К нему применимо все то, что было сказано о винной кислоте.

Псевдокубическое вещество. *Борацит.* Он встречается в форме кубододекаэдра, с гранями тетраэдра. У него имеется четыре оси полярного электричества, направленные вдоль четырех тройных осей куба. Положительные полюсы при сжатии возникают у оснований тетраэдров (Гаюи).

3. Сопоставляя эти результаты между собой, мы видим, что у всех исследованных веществ, за одним исключением — борацита, положительный полюс при сжатии возникает у того конца оси полярного электричества, у которого расположены гемиэдрические грани, образующие с этой осью более острые углы. Борацит же, который на первый взгляд представляет собой исключение, дает, напротив, интересное подтверждение вышесказанному. Действительно, Маллар, изучая оптические свойства этого вещества, показал, что, хотя кристаллографически оно обнаруживает кубическую симметрию, в действительности оно образовано наслоением и переплетением 12 пирамид; эти пирамиды происходят из 6 орторомбических гемиэдрических призм, оси гемиэдрии которых параллельны ребрам куба.[1]

Не вдаваясь здесь в описание этой группы, заметим лишь, что вдоль каждой половины тройной оси псевдокуба находятся наложенные три пирамиды. С той стороны, где находится псевдотетраэдрическая грань, видоизмененные концы гемиэдрических осей трех пирамид расположены на тройной оси; со стороны, не содержащей тетраэдрических граней, расположены неизмененные концы гемиэдрических осей трех других пирамид, находящихся на тройной оси. Конец этой тройной оси, который несет эту тетраэдрическую грань и при сжатии становится отрицательным, соответствует видоизмененным концам истинных гемиэдрических осей.

4. Все эти факты согласно показывают, что во всех изученных непроводящих гемиэдрических веществах с наклонными гранями имеется единообразная связь между положением гемиэдрических граней и направлением явления полярного электричества.

---

[1] F. E. Mallard, Ann. de mines, 10, 1876.

Конец оси полярного электричества, оканчивающийся гемиэдрическими гранями, образующими с этой осью более острые углы, при сжатии заряжается положительно, а при растяжении — отрицательно; другой конец, у которого гемиэдрические грани отсутствуют или же который оканчивается либо основанием, либо гемиэдрическими гранями, образующими с осью более тупые углы, заряжается положительно при растяжении и отрицательно при сжатии.

Физическое значение вышесказанного станет яснее, если сказать просто и кратко, что при сжатии более заостренный конец гемиэдрический формы соответствует положительному полюсу, тогда как более тупой — отрицательному.



III

ЗАКОНЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ТУРМАЛИНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

Прежде всего сформулируем законы, вытекающие из наших опытов по выделению электричества в турмалине под действием давления. Затем с краткостью, диктуемой небольшими размерами этой заметки, опишем методику наших опытов и укажем те пределы, в которых нами были проверены эти законы.

I. *Оба конца кристалла турмалина выделяют противоположные по знаку, но равные между собой количества электричества.*

II. *Количество, освобождающееся при некотором увеличении давления, противоположно по знаку и равно количеству, получающемуся при равном уменьшении давления.*

III. *Это количество пропорционально изменению давления.*

IV. *Оно не зависит от длины образца турмалина.*

V. *При одинаковом изменении давления на каждом элементе поверхности оно пропорционально этой поверхности.*

Непосредственный результат опытов, из которых были выведены законы IV и V, можно сформулировать следующим простым образом: *при одном и том же изменении давления количество выделяющегося электричества не зависит от размеров образца турмалина.*

Подлежавшие исследованию образцы турмалина имели форму призм, параллельных главной оси. Оба основания были покрыты оловянными листочками, закрытыми снаружи двумя очень толстыми стеклянными пластинками. между которыми кристалл сжимали с помощью прочного деревянного рычага. Один из оловянных листков был заземлен, другой соединен со стрелкой электрометра Томсона—Маскара. Отклонения, получавшиеся в результате изменения давления, были пропорциональны количеству выделяющегося электричества; емкость оловянных листочков в описываемых условиях была всегда пренебрежимо мала по сравнению с емкостью электрометра.

Для количественных опытов мы брали только прозрачные, бесцветные или слегка окрашенные в зеленый, желтый или розовый цвет кристаллы турмалина, представляющие собой идеальные изоляторы. Независимо от их окраски их электрические свойства почти тождественны; если и имеются некоторые различия, то они совершенно ничтожны. Однако для того, чтобы утверждать, что это всегда бывает именно так, пришлось просмотреть значительное число образцов.

Более или менее непрозрачные и черные кристаллы представляют собой проводники электричества. Один из образцов черного турмалина давал отклонение стрелки электрометра почти в пять раз меньшее, чем отклонение, получаемое при той же нагрузке с прозрачным образцом; кроме того, при этом стрелка быстро возвращалась к нулю.

Отклонения, равенство или пропорциональность которых нам надо было проверить, не были очень точными, в силу того что мы пренебрегали ошибкой, составляющей $^1/_{20}$ часть их величины. Мы не стремились достичь большей точности, так как правильность сформулированных выше законов обеспечивалась значительным различием размеров использованных образцов турмалина. При одной и той же поверхности длина их менялась от 0.5 до 15 мм, т. е. в отношении 1 : 30. При одной и той же длине образцов поверхность их менялась от 2 мм^2 до 1 см^2, т. е. в отношении 1 : 50. Исходя из точности опытов и полагая, что сформулированные законы суть предельные законы, можно поручиться, что, если удвоить длину, то отступление от истинного закона будет меньше $^1/_{600}$, а если увеличить вдвое поверхность, то оно будет меньше $^1/_{2000}$.

При одной и той же нагрузке кристалл объемом 1 мм^3 выделяет такое же количество электричества, как и образец объемом в несколько кубических сантиметров. Наконец, действие, производимое на поверхность в 1 см^2 прибавлением одного из первых килограммов, почти такое же, как действие, производимое сотым килограммом.

В своей замечательной работе Гоген [2] показал, как просты явления пироэлектричества в турмалине. Законы, которые он установил, могут быть сопоставлены с законами, составляющими предмет этой заметки. Нетрудно видеть, что их можно считать похожими, если руководствоваться высказанной нами гипотезой, предполагающей, что явления, возникающие при изменении давления, и явления, происходящие при изменениях температуры, обязаны одной и той же причине, а именно сжатию или расширению вдоль оси кристалла турмалина.





IV

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ В ТУРМАЛИНЕ И В ГЕМИЭДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ С КОСЫМИ ГРАНЯМИ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

I. Через несколько лет после опубликования своих замечательных исследований по турмалину Гоген [2] дал теорию явления пироэлектричества. Согласно Гогену, при изменении температуры турмалин уподобляется термоэлектрическому элементу с очень большим сопротивлением и очень большой электродвижущей силой. Чтобы показать возможность существования подобных элементов, он припаивал один к другому попеременно маленькие висмутовые и медные конусы, последовательно вершинами и основаниями; изменение температуры больше влияет на узкие спаи, чем на широкие, и поэтому такая система в течение некоторого непродолжительного времени представляет собой термоэлектрический столбик. Гоген уподоблял его каждой цепочке молекул турмалина.

Действительно, легко видеть, что такое представление отражает установленные им количественные соотношения. Тем не менее оно не кажется нам приемлемым: 1) оно не учитывает электрических явлений, происходящих при сжатии; 2) оно не согласуется с тем фактом, что электричество выделяется только на основаниях турмалиновых призм, а не на боковых поверхностях. Этот последний факт может быть установлен с помощью следующих опытов. Если покрыть оба основания длинного кристалла турмалина двумя оловянными листочками и соединить их с землей и попытаться тем или иным способом вызвать выделение электричества, то его нельзя будет обнаружить на боковых сторонах при помощи металлического кольца, соединенного с электрометром, даже если кольцо будет находиться почти у одного из концов кристалла. Наоборот, количество электричества, выделяющееся на основаниях, оказывается всегда одним и тем же независимо от того, будет ли боковая поверхность покрыта оловянным листком, соединенным с землей, или не будет.

Гоген заземлял одно из оснований, оставляя другое изолированным, и обматывал середину кристалла платиновой проволокой, соединенной

с электрометром; при охлаждении он обнаруживал выделение электричества того же знака, что и на изолированном основании. В этом опыте нет ничего противоречащего вышесказанному: электричество, которое выделяется на изолированном основании, заряжает внешний слой кристалла, играющего роль обкладки некоторого конденсатора, изолирующим слоем которого является сам кристалл. Электричество того же знака отводится платиновой проволокой; электричество же противоположного знака, как это легко показать, притягивается и конденсируется. Для этого достаточно разрядить платиновую проволоку и соединить ее с электрометром, а затем разрядить основание, остававшееся до сих пор изолированным; конденсированные заряды противоположного знака вызовут через платиновую проволочку некоторое отклонение [стрелки электрометра].

II. Предположения о поляризации молекул, которые высказывались более или менее неопределенно начиная с 1825 г. (Беккерелем, Форбсом и др.), могут объяснить рассматриваемое явление лучше, чем предположение Гогена. Такого же мнения придерживается и Томсон [3], который, так же как некогда Форбс, предполагает, что молекулы всегда поляризованы и что слой конденсированного электричества на поверхности турмалина нейтрализует их внешнее действие; нагревание изменяет состояние поляризации, в результате чего нейтрализация уже не имеет места.

Наша точка зрения аналогична этой, так как представление о том, что молекулы поляризованы, находится в полном согласии с тем фактом, что свободное электричество обнаруживается только на основаниях. В самом деле известно, что цилиндр, образованный молекулами, равномерно поляризованными параллельно образующей, может быть заменен двумя наэлектризованными слоями на обоих основаниях [цилиндра].

Мы попытались объяснить причины поляризации и ее изменения, предполагая, что между противолежащими поверхностями двух соседних слоев молекул существует постоянная разность потенциалов; это влечет за собой конденсацию электричества, зависящую от расстояния между этими слоями; если по какой-либо причине это расстояние меняется (из-за изменения давления или температуры), то изменяется и количество конденсированного электричества. Вышесказанное удобно пояснить на примере системы, состоящей из столбика спаянных между собой пластинок цинка и меди (элементов Вольта), одинаково ориентированных и разделенных одна от другой равными слоями воздуха.

Пусть e — толщина такой прослойки, v — электродвижущая сила контакта цинк—медь. Если все эти пластинки первоначально были заземлены, то на противолежащих сторонах между двумя последовательными слоями конденсируется количество электричества

$$q = \frac{vs}{4\pi e},$$

только если эти слои достаточно близки друг к другу.

При изменении расстояния между пластинками это количество будет

$$q + \Delta q = \frac{vs}{4\pi(e + \Delta e)}.$$

Таким образом, на крайних пластинках выделятся разноименные заряды в количестве

$$\Delta q = \frac{vs}{4\pi}\left[\frac{\Delta e}{e^2\left(1 + \frac{\Delta e}{e}\right)}\right].$$

Что касается внутренних пластинок, то противоположные заряды, выделяющиеся на каждой из них, взаимно нейтрализуются; в результате внутренние пластинки будут как бы изолированы; именно такой случай нас и интересует.

Если в последней формуле пренебречь величиной $\frac{\Delta e}{e}$ по сравнению с единицей, то количество выделенного электричества будет пропорционально изменению расстояния между двумя последующими слоями; оно пропорционально поверхности s, не зависит и от числа слоев и, следовательно, от общей толщины столбика. Именно эти законы и были обнаружены в результате экспериментов, проведенных с турмалином.

III. Оказавшись в ходе обсуждения гипотез, высказанных еще до нас, перед необходимостью сформулировать наше понимание данных явлений, представляющееся нам наиболее правдоподобным, мы принимаем и все вытекающие отсюда следствия, не строя иллюзий относительно зыбкости такой почвы. Гипотеза, из которой мы исходили, состоит в том, что между противолежащими поверхностями двух последовательных слоев существует постоянная разность напряжений.

Так как турмалин — сложное тело, то различные части молекулы кристалла могут быть образованы из различных веществ; это могло бы объяснить разность напряжений у противолежащих концов двух молекул.

Но возможно также, что при однородности вещества уже сама форма молекул дает достаточное основание для оправдания гипотезы; можно даже сказать, что опыт согласуется с этим объяснением лучше, чем с предыдущим (обычные представления, вероятно, уже не применимы к самим молекулам).

В самом деле, все кристаллографические теории сходятся в том, чтобы приписать самим молекулам причину той диссимметрии, которая открывается нам в особенностях кристаллических форм. Мы же показали, что у всех изученных непроводящих гемиэдрических веществ направление полярности выделяющегося электричества всегда связано с кристаллической формой, причем конец, соответствующий наиболее острому телес-

ному углу, при расширении заряжается отрицательно. Такое постоянное соотношение, вероятно, не случайно, поэтому, приняв аналогию между формой молекулы и гемиэдрической формой кристалла, мы принуждены признать, что острый конец молекулы по отношению к противостоящему основанию следующей молекулы всегда играет такую же роль, как цинк по отношению к меди в примере приведенной нами аналогии, т. е. всегда заряжается положительным электричеством. По-видимому, природу вещества можно не принимать в расчет; преобладающее значение, очевидно, имеет только форма молекулы.



V

ГЕМИЭДРИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ С КОСЫМИ ГРАНЯМИ КАК ПОСТОЯННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

I. Пластинка, вырезанная подходящим образом из гемиэдрического кристалла с косыми гранями и помещенная между двумя оловянными листочками, образует конденсатор, способный самостоятельно заряжаться при сжатии. С помощью такой системы можно осуществить новый прибор — конденсатор-источник, обладающий особыми свойствами. Мы укажем на эти свойства, вытекающие из установленных нами ранее законов выделения электричества в гемиэдрических кристаллах, и покажем, как такой прибор может работать в качестве эталона статического электричества при измерении зарядов и емкостей.

Мы приведем также в этой статье абсолютную величину количества электричества, выделяемого турмалином и кварцем при определенном давлении.

II. Необходимо напомнить три основные свойства кристалла, служащего в качестве конденсатора-источника: 1) две грани заряжаются строго равными и противоположными по знаку количествами электричества; 2) если одна из граней соединена с землей, то на другой выделяется количество электричества, определяемое величиной давления; 3) существует пропорциональность между выделенным количеством электричества и приложенным давлением.[1]

Из этих положений вытекает, что, подобно тому как батарея элементов позволяет держать проводник при определенном потенциале, так и конденсатор-источник позволяет сообщать проводнику определенное количество электричества; кроме того, это количество может быть задано заранее, если только оно не превышает известной величины.

---

[1] Практически тот предел, за которым этот закон уже не должен соблюдаться, никогда не достигается, и пропорциональность сохраняется с точностью погрешности опытов, вплоть до давлений, близких к тем, которые вызывают разрушение кристалла.

III. Количество электричества, выделяющееся при нагрузке на турмалин в 1 кг, способно зарядить шар диаметром 14.2 см до потенциала 1 даниель [2], т. е., иначе говоря, это количество равно 0.0531 электростатических единиц CGS заряда. Количество электричества, выделяющееся при нагрузке 1 кг на пластинку кварца, вырезанную перпендикулярно горизонтальной оси, способно удерживать шар диаметром 16.6 см при потенциале 1 даниель, т. е. оно равно 0.062 электростатических единиц CGS заряда.

Эти величины определяют то, что можно назвать способностью турмалина и кварца электризоваться под давлением [3].

IV. Абсолютные измерения, результаты которых мы привели, были произведены с помощью бруса, непосредственно давившего на кристалл; однако если хотят использовать кристалл как источник электричества, то более удобно производить давление с помощью рычага; необходимо также, чтобы кристалл находился в сухой оболочке. В таком случае не стоит пользоваться плечами рычага, а лучше непосредственно, раз навсегда определить то количество электричества, которое выделяет кристалл при нагрузке 1 кг, приложенной к концу рычага; если затем этот кристалл оберегать от тряски, то он может служить эталоном.

Количество выделяющегося электричества всегда можно определить следующим образом: стрелку электрометра Томсона—Маскара заряжают с помощью батареи, один из оловянных листочков соединяют с землей, другой — с одной парой секторов электрометра и одновременно с некоторым проводником известной емкости (шаром, воздушным конденсатором) — эталоном в 1 мкф. Всю эту систему проводников изолируют. Вторую пару секторов электрометра соединяют с одним из полюсов элемента Даниеля (другой полюс заземлен). Стрелка электрометра отклоняется; прибавляют груз, действующий на кристалл, до тех пор, пока это не вернет стрелку к нулю (такая операция производится совершенно так же, как обычное взвешивание, когда кладут и снимают гири; количество выделяющегося электричества зависит только от окончательного давления). Пластинка конденсатора-источника, эталон емкости и сектор электрометра находятся при этом при потенциале 1 даниель; кроме того, нам известен тот вес, который необходим для достижения этого результата. Ту же операцию повторяют после удаления эталона емкости. Разность весов, получающихся в первом и во втором случае, представляет собой тот вес, который необходим для удержания эталона емкости при потенциале, равном 1 даниелю [4].

V. Описанный нами метод представляет собой некоторый процесс сравнения емкостей. Действительно, путем трех взвешиваний можно определить количество электричества, необходимое для удержания двух проводников при одном и том же потенциале, откуда получается отношение их емкостей.

Наоборот, заряжая два сектора от двух различных элементов и подбирая грузы, необходимые для приведения одной и той же емкости к по-

тенциалу каждого из них, получим отношение электродвижущих сил этих элементов.

Наконец, можно с большой точностью измерять заряд: заряженное тело соединяют с конденсатором-источником и с каким-нибудь электрометром, причем последний показывает наличие заряда; помещая грузы на конденсатор, приводят электрометр к нулю.

Преимущество этих методов состоит в том, что электрометр всегда приводят к нулю; он, следовательно, служит только электроскопом, а это позволяет использовать более высокую чувствительность. Измерения емкостей и зарядов проводятся также с большей точностью. Прибор может, кроме того, служить восстановителем заряда для поддержания при одном и том же потенциале тела, которое постоянно теряет электричество, но которое должно оставаться изолированным.

VI. Параметрами конденсатора-источника служат: 1) количество электричества, выделяемое грузом в 1 кг на конце рычага; 2) его емкость. Чтобы зарядить тела весьма малой емкости, полезно иметь конденсатор-источник с очень малой емкостью; емкость турмалина или кварца толщиной 1 см и с поверхностью в несколько квадратных миллиметров не превосходит емкости шара радиусом 1 см и поставляет количество электричества, способное зарядить шар радиусом 3 м до потенциала 1 даниель.

Чтобы зарядить тела с несколько бо́льшей емкостью, нет большого затруднения в увеличении емкости конденсатора-источника, и таким способом можно получать гораздо более значительное количество электричества; мы построили батарею из 9 пластин кварца, вырезанных параллельно одна другой и перпендикулярно одной из горизонтальных осей из одного и того же куска достаточно однородного кварца. Каждая пластинка имела поверхность приблизительно 20 см^2; их поставили друг на друга в столбик, разделив оловянными листочками; все четные пластинки были перевернуты; в результате такого расположения при изменении давления на столбик все оловянные листочки четного порядка заряжались электричеством одного знака, а все листочки нечетного порядка — другого. Соединяя друг с другом с одной стороны, все четные оловянные листки, а с другой — все нечетные, получаем конденсатор-источник, емкость которого равна емкости шара радиуса 3.5 м. Он легко позволяет зарядить $^1/_{10}$ мкф до потенциала 1 даниель; только лишь затруднения, связанные с большими давлениями, препятствуют значительному превышению этого значения.

Из опытов, проведенных с пластинками малых размеров, следует, что кварцевый столбик может без затруднения, имея в виду его большую поверхность, выдержать давление 6000 кг и выделить тогда количество электричества, способное зарядить 10 мкф до потенциала 1 даниель.

VI

СЖАТИЯ И РАСШИРЕНИЯ, ПРОИЗВОДИМЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ В ГЕМИЭДРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ С КОСЫМИ ГРАНЯМИ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

Предположим, что твердое тело, например стеклянная призма, обладающая поверхностью в 1 см^2, удлиняется на одну миллионную своей длины. Эту величину очень трудно обнаружить прямым способом.

Но если совершенно воспрепятствовать этому изменению длины, то твердое тело будет испытывать изменение давления около 1 кг. Чувствительная система, позволяющая обнаруживать или измерять такое давление, позволила бы косвенным путем судить о тех изменениях длины, которые могли бы от этого произойти. Такой метод, как видно, основан на малости коэффициента сжимаемости твердых тел.

Мы создали прибор, выполняющий эти условия, использовав для этого способность кварца выделять электричество в количестве, пропорциональном испытываемому им давлению, когда он подвергается влиянию сил, действующих на него в определенных направлениях.

Опишем этот прибор, подробно изложив те применения его, которые были осуществлены для обнаружения явления, обратного электрической поляризации гемиэдрических кристаллов.

Известно, что если гемиэдрический кристалл с косыми гранями подвергать действию изменяющегося давления вдоль оси гемиэдрии, то на концах этой оси образуются равные по величине, по противоположные по знаку электрические заряды, причем знаки этих образующих зарядов связаны с направлением изменения давления.

Наши последние опыты показали, что, наоборот, если зарядить электричеством противоположного знака концы оси гемиэдрического кристалла, то он испытывает вдоль этой оси либо сжатие, либо растяжение в зависимости от направления, в котором к нему приложено электрическое напряжение.

Направления этих двух взаимно обратных явлений связаны между собой следующим общим законом, формулировку которого мы заимствуем у Липпмана и который представляет собой не что иное, как некоторое обобщение закона Ленца: «Направление всегда таково, что обратное явление стремится воспрепятствовать возникновению исходного явления».

Липпман, который основывался одновременно на принципе сохранения электричества и на принципе сохранения энергии и на свойствах прямого явления, смог предсказать и заранее описать все особенности обратного явления [1] [2]. Он же указал и способ, каким можно заранее рассчитать его величину для определенной разности потенциалов, если известно количество электричества, выделяемое при определенном давлении.

Ранее мы измерили количество электричества, выделяемое турмалином и кварцем при давлении 1 кг; произведя расчет, находим, что призмы из этих веществ испытывают изменение длины около $^1/_{20\,000}$ мм при наложении разности потенциала, соответствующей искре 0.01 мм в воздухе.

Вот как был проведен опыт: прибор состоял из двух массивных бронзовых пластин, соединенных тремя массивными колоннами, составляющими одно целое с одной из пластин и проходящими через другую пластину и оканчивающимися винтовой резьбой с гайками.[2] Таким способом можно было с помощью гаек зажать между двумя пластинками столбик из предметов, наложенных один на другой.

Эти предметы образуют две различные системы: нижняя система служит исключительно для измерений изменений давления; она состоит из трех широких и тонких кварцевых пластинок, разделенных металлическими прослойками, присоединенными к электрометру, который отмечает заряды, выделенные кварцевыми пластинками, подвергаемыми изменениям давления. Верхняя система предназначена для получения изучаемого явления. В интересующем нас случае эта система состояла из трех гемиэдрических кристаллов возможно большего объема, отделенных друг от друга двумя медными кружочками. Гемиэдрические оси трех кристаллов были параллельны направлению сдавливания. Два крайних кристалла были повернуты в направлении, противоположном среднему, т. е. к одному из медных кружочков примыкали два основания, заряжавшиеся при сдавливании положительно, а к другому — два, заряжавшиеся отрицательно. Оба внешних основания этого столбика из трех кристаллов были соединены с землей. Два медных кружка можно было присоединить к полюсам машины Гольца [3]. Мы работали с турмалином и с кварцем.

Если соединить положительную ветвь машины Гольца с медным кружком, примыкающим к граням кристаллов, заряжающихся положительно при сдавливании, а отрицательную ветвь — с кружком, примыкающим

---

[1] G. Lippmann. Principe de la conservation de l'électricité. Ann. de chim. et de phys., 24, 145, 1881.

[2] См. рис. 2 на стр. 34.

к отрицательным граням, то кристаллы обоих этих веществ будут стремиться расшириться вдоль оси сдавливания. При посредстве нижней системы, подвергаемой увеличивающемуся давлению, электрометр покажет наличие этого расширения; когда действие машины прекращается, электрометр еще сохраняет свои показания. Наконец, если обратить знак напряжения на обратный, кристаллы будут сокращаться и все эти явления изменят свои направления на обратные.

Это явление обнаруживается уже при напряжении, соответствующем искре длиной в $^1/_2$ мм; оно, по-видимому, пропорционально разности напряжений.

До сих пор нам не удалось провести измерения, но подсчет, сделанный нами для кварца, хотя и грубо приближенный ввиду неточности использованных нами данных, показал, что явление имеет тот же порядок величины, что и предсказываемый теоретически[3] [4].



[3] Обе системы, и та, которая служила для получения электрического явления, и та, которая служила для измерения, были электрически совершенно изолированы друг от друга; каждая из них была полностью закрыта соответствующей металлической оболочкой, соединенной с землей.

Мы, тем не менее, не пренебрегали многочисленными проверками, которые позволяли удостовериться, что мы не имели здесь дело с каким-либо индукционным явлением. Эти предосторожности необходимы, ибо дело идет об обнаружении очень малых количеств электричества, которые выделяются при чрезвычайно высоких напряжениях, имеющихся в машине Гольца.

VII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ КВАРЦА [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

Каждому способу вызывать в кварце выделение электричества посредством давления [1] соответствует обратное явление. Пусть некоторый параллелепипед имеет две грани, перпендикулярные электрической оси, а две другие — оптической оси; если между гранями, перпендикулярными электрической оси, имеется некоторая разность потенциалов, то кварц расширяется вдоль электрической оси и сокращается по направлению, перпендикулярному оптической и электрической осям; или, наоборот, сокращается вдоль первого направления и расширяется вдоль второго в зависимости от знака приложенного напряжения. Третье направление при этом не изменяется. Направления прямого и обратного явлений связаны между собой законом противодействия, аналогичным закону Ленца. Каждая из этих деформаций пропорциональна разности потенциалов. Наконец, в каждом направлении величина расширения при разности потенциалов, равной абсолютной электростатической единице CGS, выражается в сантиметрах тем же числом, каким выражается по абсолютной величине количество электричества, выделенное при давлении, равном 1 дине, приложенном в рассматриваемом направлении.

Удлинение в направлении электрической оси не зависит от размеров пластинки; оно слишком мало, чтобы его можно было обнаружить непосредственно, но, чтобы сделать его явным, можно противодействовать тому, что вызывает эту деформацию, применяя большие поверхности и используя образующиеся при этом достаточно значительные изменения давлений. Так мы и поступили. Такой метод наиболее чувствителен, однако неточное знание или полное незнание коэффициентов упругости не позволило нам провести количественные опыты. Напротив, расширение в направлении, нормальном к оси, зависит от размеров параллелепипеда; оно равно расширению вдоль оси, когда отношение активных раз-

[1] См.: J. de phys., 1, 245, 1882.

меров равно единице; изменяя эти размеры, расширение можно сделать бо́льшим, видимым и измеримым с помощью микроскопа, особенно если воспользоваться еще рычагом.

Прибор, которым мы пользовались, был устроен следующим образом: пластинка кварца, поверхности которой, перпендикулярные к электрической оси, были покрыты двумя оловянными листками, имела весьма малую толщину в направлении этой оси; она была закреплена одним из своих длинных концов (длина ее была перпендикулярна обоим осям — электрической и оптической) на прочном основании.

Второй конец, снабженный небольшим жестким наконечником, подпирал короткое плечо рычага. На конце длинного плеча укреплялась паутинка, которую наблюдали в микроскоп с окулярным микрометром.

Изменения длины кварцевой пластинки усиливались раз в 50. Электрическое напряжение создавалось заряжением оловянных листков с помощью машины Гольца, соединенной с батареей в 10 лейденских банок. Таким образом, напряжение устанавливалось достаточно медленно и можно было заметить смещение рычага в тот момент, когда между двумя шариками проскакивала искра.

Измерение состояло из двух частей:

1) способами, описанными ранее, опытным путем определяли абсолютное количество электричества, выделяемое той пластинкой, которая была покрыта листками олова, и той, которую затем предполагалось использовать во второй части:

2) с помощью вышеописанного прибора измеряли изменения длины, соответствующие нескольким значениям разности потенциала, определяемым величиной пробивного расстояния между шариками диаметром 6 см, используя при этом результаты Байя [2].

	Пластинка [2] 1	Пластинка [2] 2
Растягивающая нагрузка, необходимая для того, чтобы зарядить емкость 0.5 м до напряжения 1 даниель	258 г	48.5 г
Отсюда, растягивающая нагрузка в 1 дину выделяла бы абсолютное количество электричества, равное	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$39.3 \cdot 10^{-7}$
Отсюда, вычисленное растяжение в см, отнесенное к единице разности потенциалов	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$39.3 \cdot 10^{-7}$
Отсюда, вычисленное расширение в мм для разности потенциалов, равной 14.8, соответствующей искре длиной 1 мм в воздухе между шариками в 0.06 м	—	0.00058 мм
Отсюда, вычисленное расширение в мм для разности потенциалов, равной 65.2 (искра 6 мм)	0.00048	—
Смещение конца рычага в делениях микрометра при напряжении, соответствующем искре в 1 мм	—	6.7
Смещение при напряжении, соответствующем искре в 6 мм	5.0	—
Значения этих смещений в мм	0.0206	0.0276
Отношения плеч рычага	40.8	46.5
Отсюда, измеренное расширение в мм	0.00050	0.00061

[2] Толщина пластинок была 2.4 и 0.65 мм; длина оловянных листков — около 27.8 и 40 мм.

Измеренные растяжения были 0.00050 и 0.00061 мм, растяжения же, вычисленные по выделенным количествам электричества, были 0.00048 и 0.00058 мм. Эти результаты надо считать удовлетворительными. Даже не рассматривая многочисленных привходящих обстоятельств, эти расхождения легко объяснить погрешностью отсчета при измерении электрических расширений. Эти определения представляют собой, следовательно, не только качественную, но и численную проверку следствий, выведенных г. Липпманом из принципов сохранения энергии и сохранения электричества. Пропорциональность между расширением и разностью потенциалов также хорошо подтверждается; однако наши опыты могли быть проведены только в пределах весьма ограниченных напряжений.



VIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ КВАРЦА [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. КЮРИ)

Первая часть этой работы относится к давним опытам (1881).[1] В то время когда они были предприняты, Липпман [2] в работе, посвященной применению основных принципов сохранения энергии и электричества и принципа Карно, показал, в частности, что знание открытого нами явления пьезоэлектричества [2] позволяет теоретически предсказать электрическое расширение кварца, его величину, направление, а также и природу этого явления. Предпринятые нами в то время опыты подтвердили это положение.

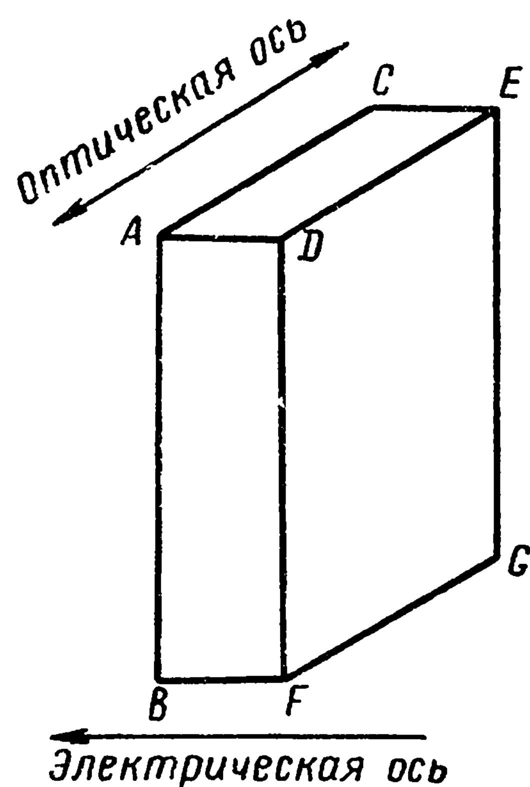


Рис. 1.

Кроме специального интереса, который эти опыты могли представлять, они, как оказалось, имеют и общий интерес, так как подтверждают выводы теории, охватывающей большое число явлений.

Дадим сперва общую картину сущности явлений.

Рассмотрим прямоугольный параллелепипед из кварца (рис. 1), четыре ребра которого, таких, как AD, параллельны одной из электрических осей, а четыре ребра, таких, как AC, параллельны оптической оси.

Первый случай. Если сжимать кристалл перпендикулярно граням ABC, $DEFG$, т. е. если приложить усилие в направлении электрической оси, то на этих гранях выделится количество электричества, выражаемое формулой

$$q = Kf,$$

---

[1] C. r., 93, 1137, 1881 [наст. изд., стр. 9]; 95, 914, 1882 [наст. изд., стр. 27].

[2] G. Lippmann, J. de phys., 10, 381, 1881; Ann. de chim. et de phys., (V), 24, 145, 1881.

где q — выделившееся количество электричества, f — сила и K — пьезоэлектрическая постоянная.

Мы нашли, что сила в 1 кг, приложенная при этих условиях непосредственно к кристаллу, выделяет количество электричества, достаточное для того, чтобы поддерживать шар в 16.6 см при потенциале в 1 даниель; отсюда для пьезоэлектрической постоянной в абсолютных электростатических единицах CGS получается

$$K = 6.32 \cdot 10^{-8}.$$

K — есть абсолютное значение количества электричества, выделяемого при действующем на кварц усилии, равном 1 дине.

Этому пьезоэлектрическому выделению электричества соответствует явление электрического расширения δ в направлении электрической оси, если между двумя перпендикулярными к ней гранями (посеребренными) приложить разность потенциалов V; тогда будем иметь

$$\delta = KV = 6.32 \cdot 10^{-8} \cdot V.$$

Здесь δ выражено в сантиметрах.

Мы видим, что величина расширения в направлении электрической оси не зависит от размеров кристалла.

Впрочем при доступных нам напряжениях эта величина чрезвычайно мала; при $V=14.8$, т. е. около 4400 в, что соответствует искре длиной 1 мм в воздухе, имеем

$$\delta = 0.935 \cdot 10^{-6},$$

т. е. в микронах 0.00935, или приблизительно $^1/_{100}$ мк [3].

Второй случай. Если сжимать кристалл в направлении оптической оси, т. е. по нормали к граням $ADBF$, CEG, то никакого выделения электричества не возникает. Наоборот, если наложить какое-нибудь электрическое напряжение, то длина оптической оси не изменится.

Третий случай. Если сжимать кристалл в направлении, перпендикулярном к оптической и электрической осям, т. е. по нормали к граням $ADEC$, BFG, то выделение электричества происходит на гранях ABC, $DFGE$, нормальных к электрической оси. Выделение электричества имеет знак, обратный тому, который вызвало бы сжатие в направлении электрической оси; оно выражается формулой

$$q = -K \frac{L}{e} f,$$

в которой K — та же постоянная, что и в предыдущем случае:

$$K = 6.32 \cdot 10^{-8},$$

где L — длина AB параллелепипеда в направлении, перпендикулярном к оптической и электрической осям; e — длина стороны AD, параллельной электрической оси.

Наоборот, если создать разность потенциалов между двумя гранями ABC и DFG, перпендикулярными к электрической оси, то кристалл будет стремиться расшириться или сжаться в направлении, перпендикулярном к оптической и электрической осям. Эти действия выражаются формулой

$$\delta = -K \frac{L}{e} V = -6.32 \cdot 10^{-8} \frac{L}{e} V,$$

где δ выражено в сантиметрах, а V — в электростатических единицах [4].

В этом случае явление зависит от двух размеров кристалла и может быть значительно усилено, если взять пластинку, весьма тонкую в направлении электрической оси и очень длинную в направлении, нормальном к оптической и электрической осям.

Итак, когда между двумя гранями параллелепипеда из кварца, перпендикулярными к электрической оси, прикладывают некоторую разность потенциалов, то параллелепипед деформируется; оптическая ось всегда сохраняет неизменную длину, но другие размеры изменяются. При определенном направлении параллелепипед сокращается вдоль электрической оси, а в направлении, перпендикулярном к оптической и электрической осям, он удлиняется. При напряжении обратного знака электрическая ось удлиняется, а другое направление сокращается.

Явления пьезоэлектричества и электрического расширения связаны между собой законом противодействия, аналогичным закону Ленца. Следовательно, направление расширения связано с кристаллической формой кварца. Кварц сжимается в направлении электрической оси, когда положительный заряд находится на том конце этой оси, который соответствует ребру гексагональной призмы, несущей грани дитриэдра.

Наоборот, этот конец заряжается отрицательным электричеством, когда кристалл сжимается в направлении этой оси.[3]

Исследование с прессом и пьезоэлектрическим манометром

Мы прежде всего стремились выявить расширение в направлении электрической оси. Как мы видели выше, это явление чрезвычайно слабое; для расширения δ, выраженного в сантиметрах, имеем

$$\delta = 6.32 \cdot 10^{-8} V;$$

[3] По редакционному недосмотру мы указали в статье в J. de phys. (1, 245, 1882) противоположное этому направлению по отношению к граням кристалла. Этой ошибки нет в прежних наших статьях (Bull. de la Soc. minéral., 90, 1880; C. r., 91, 294, 1880)

при $V=1$, т. е. около 300 в, для δ в мк получаем

$$\delta = 0.000632 \text{ мк};$$

при разности потенциалов, соответствующей искре длиной 1 мм, $V=14.8$, т. е. около 4400 в и для соответствующего значения δ в мк имеем

$$\delta = 0.00935,$$

т. е. около $^1/_{100}$ мк или $^1/_{50}$ длины волны.

Подобное расширение с трудом может быть обнаружено при помощи колец интерференции и само существование явления с помощью этого метода крайне трудно сделать несомненным. Мы использовали другой метод, применение которого может быть расширено и который обладает чрезвычайной чувствительностью при определении расширения твердого тела. Этот метод основан на следующем: предположим, что некоторое твердое тело, например стеклянная призма с основанием 1 см^2,в результате действия какого-нибудь физического агента испытывает изменение длины, равное одной миллионной своей величины; такое удлинение было бы трудно обнаружить непосредственно.

Но если каким-нибудь способом противодействовать тому, чтобы это изменение длины могло произойти, закрепив концы этой призмы между двумя совершенно неизменными опорами, то результат действия этого физического агента будет заключаться в значительном увеличении давления: действительно в выбранном нами примере это увеличение давления достигает 1 кг.

Чувствительный манометр, позволяющий при этих условиях измерять такие изменения давления, будет также чрезвычайно чувствительным и к действию рассматриваемого физического агента.

В качестве такого манометра мы использовали пьезоэлектрический кварц, соединенный электрически с квадрантным электрометром.

Вот как были осуществлены наши опыты.

Прибор представлял собой пресс, состоящий из двух массивных бронзовых плит, соединенных тремя колонками, образующими одно целое с одной из плит и проходящими через другую и заканчивающимися резьбой, снабженной гайками. С помощью этих гаек между двух плит сжимается столбик, состоящий из нескольких поставленных один над другим предметов. Эти предметы разделены на две отдельные, почти одинаковые между собой системы (рис. 2).

Нижняя система служила только для измерения изменения давления; она состояла из трех кварцевых пластинок a, b, c, разделенных двумя металлическими листками, сообщающимися с квадрантами электрометра e, обнаруживающего электричество, выделяемое кварцевыми пластинками при изменении давления.

Эти три пластинки вырезаны перпендикулярно электрической оси; внутренняя пластинка перевернута, так что направление ее оси противоположно направлению осей двух других пластинок.

Легко понять, что при таких условиях во время изменения давления эти три пластинки совместно стремятся сообщить обоим промежуточным металлическим листкам заряды противоположных знаков.

Стрелки на рисунке указывают направления осей всех трех пластинок.

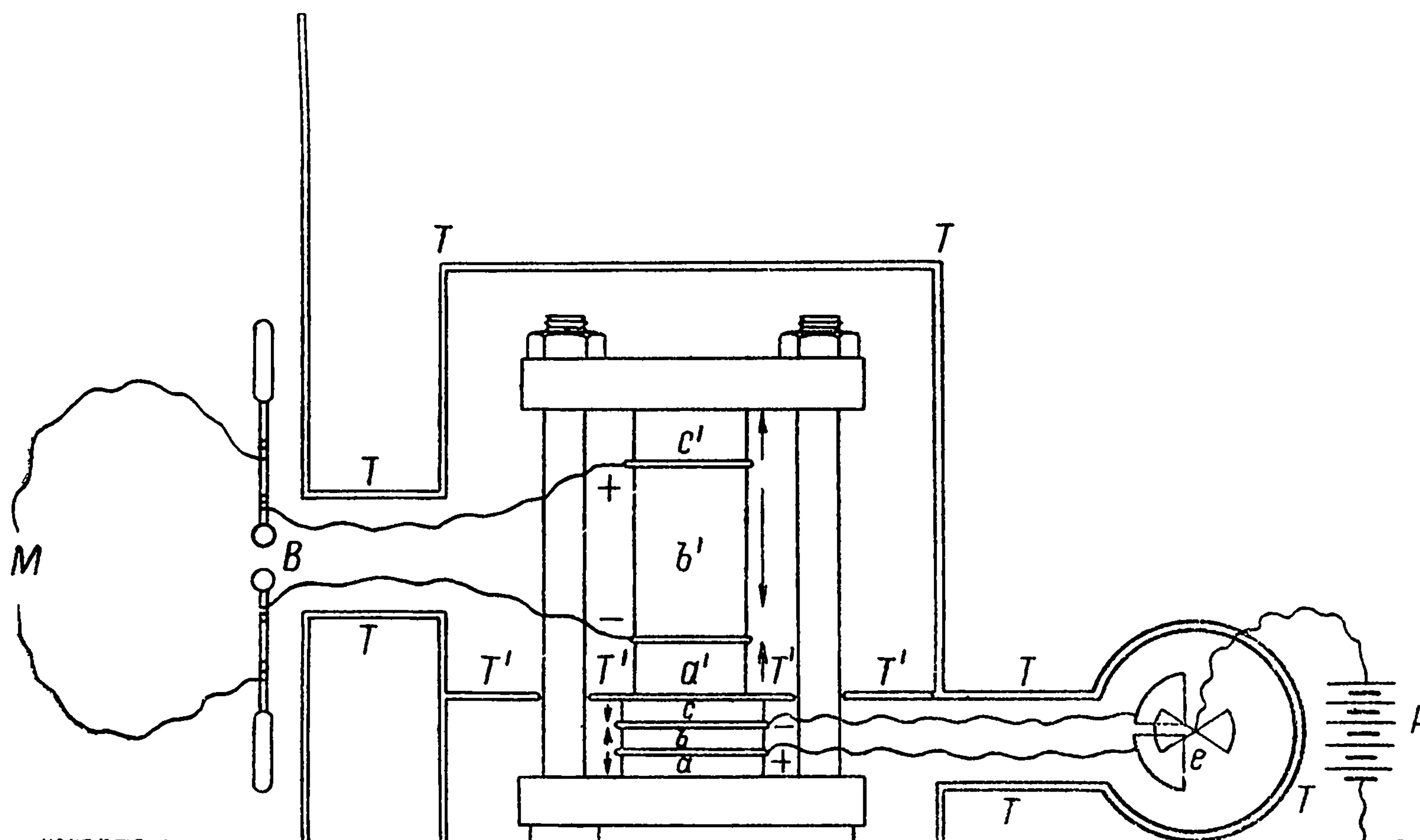


Рис. 2.

Верхняя система a', b', c' одинакова с предыдущей, только две промежуточные металлические пластинки соединены с двумя полюсами машины Гольца (M). Кварцевые пластинки этой системы толще, чем пластинки нижней. Это сделано для того, чтобы можно было применять достаточно высокие потенциалы без проскакивания искры.

Если сообщить одной из промежуточных металлических пластинок положительный потенциал, а другой — отрицательный, то согласно теории, о которой мы говорили выше, все три кристалла будут стремиться вызвать сжатие или расширение верхней системы. Когда пресс зажат, эти деформации не могут произойти свободно, и в результате во всей колонне получится изменение давления. В нижней системе выделится тогда некоторое количество электричества, которое вызовет отклонение электрометра.

Чтобы хорошо провести эти опыты, необходимо соблюсти известные предосторожности; действительно, дело идет о том, чтобы измерить очень

малое количество электричества, выделяемое нижней системой, при наличии громадных напряжений машины Гольца, приложенных к верхней системе. Малейшее проявление влияния этой машины на части, соединенные с электрометром, будет маскировать то явление, которое хотят исследовать. Поэтому обе системы, и та, которая служит для его измерения, и та, которая служит для порождения явления, должны быть тщательнейшим образом изолированы друг от друга. Каждая из них заключена в металлические оболочки T, T, . . ., соединенные с землей.

Нижняя система, которая служит манометром, в свою очередь вместе с электрометром полностью заключена в металлическую оболочку. Корпус пресса также соединен с землей. Медная пластинка T', T', . . ., соединенная с землей, зажата между двумя наборами кварцевых пластинок, которые она полностью разделяет в отношении электрического влияния. Эта пластинка, размеры которой больше размеров пресса, свободна от указанных упругих напряжений, так как колонки, проходящие через три широких отверстия, проделанные в ней для этой цели, не касаются ее. Надежное металлическое соединение между колонками и пластинками осуществлено посредством гибких оловянных листочков. Всегда можно убедиться в эффективности этих предосторожностей: для этого достаточно провести опыт вхолостую при незатянутых гайках; при таких условиях электрическое напряжение, установившееся в верхней системе, совершенно не должно влиять на нижнюю.

Весь комплект приборов должен быть тщательно просушен. На рис. 2 буквой P обозначена батарея элементов, приключенная к электрометру.

Вот как проходил опыт. Начинали с того, что после сборки средней части установки очень сильно зажимали пресс. Как только достигалось большое давление, начиналась усадка частей, приводящая к уменьшению давления; только через час, когда эта усадка полностью заканчивалась, указатель электрометра неподвижно устанавливался на нуле.

После этого можно зарядить металлические пластинки верхней системы от машины Гольца. Для того чтобы разность потенциалов устанавливалась медленно и плавно, оба полюса машины присоединяются к батарее лейденских банок. Между полюсами находился микрометр с шариками B, позволяющий по известной величине искрового промежутка определять потенциал в момент разряда. Если теперь начать вращать машину, потенциал будет медленно устанавливаться, соответственно электрометр будет все сильнее и сильнее отклоняться; отмечают его отклонение в момент образования искры между обоими шариками микрометра.

В момент проскакивания искры зайчик электрометра мгновенно возвращается к нулю.

Ход явления хорошо соответствует теории, и отклонения электрометра пропорциональны разности потенциала батареи, определяемой пробивным расстоянием.

Приводим числовую таблицу, подтверждающую это заключение:

Пробивные расстояния (в мм)	Отклонение электрометра Δ	Разности потенциала V	$\frac{\Delta}{V}$
1	21.5	14.8	1.45
2	38.7	25.6	1.51
3	54.0	36.1	1.49
4	69.5	45.7	1.52
5	84.0	55.1	1.52
6	105.0	65.3	1.60

Искры получались между шариками диаметром 6 см; числа третьего столбца даны Байем.[4]

Впрочем, пропорциональность отклонений разности потенциалов была установлена нами гораздо более точно, а именно, что абсолютное значение отклонения электрометра не изменяется при переключении полюсов машины Гольца и при неизменности искрового промежутка.

В самом деле, очень вероятно, что при отсутствии пропорциональности существовало бы некоторое различие в интенсивности действий, производимых электрическими напряжениями противоположных направлений. К сожалению, мы не могли произвести измерения действительной величины явления, так как упругие характеристики прибора были нам совершенно неизвестны. Предполагая, что сжимается только один кварц, и считая, что он имеет такой же коэффициент упругости, как стекло, мы получили путем расчета числа того же порядка, что и полученные из опыта. Однако такая проверка весьма груба [5].

Мы повторили с успехом эти опыты, применяя призмы из турмалина с основаниями, вырезанными перпендикулярно к электрической оси.

Чувствительность прибора очень высока; она, очевидно, зависит от площади основания применяемых кристаллов, которая должна быть возможно большей, и от высоты столбика кристаллов, которая должна быть возможно меньшей. В случае кварца с площадью основания 7 см^2 и при общей высоте столбика 10 см чувствительность была такова, что разность потенциалов, соответствующая искровому промежутку в 1 мм между шариками диаметром 6 см, давала на шкале отклонение, равное 25 см. В тех же условиях можно было заметить действие, производимое в 200 раз меньшей разностью потенциалов.

Если бы эти кристаллы были свободны и не подвергались сжатию, то, согласно теории, при таком изменении потенциала они расширялись бы приблизительно на 0.0001 мк.

Как мы уже сказали раньше, мы полагаем, что этот прибор может быть применен для других целей. С ним можно было бы, например, изучать расширения и сжатия, которые испытывают тела под влиянием магне-

---

[4] J. Baille, Ann. de chim. et de phys., 25, 486, 1882.

тизма. Для этого достаточно было бы заменить в прессе верхнюю систему пластин из кварца телом, подлежащим изучению, оставив в качестве манометра нижние пластины, приключенные к электрометру [5] [[6]].

Измерения электрических расширений посредством увеличительного рычага и микроскопа

Как мы видели раньше, расширения в направлении, перпендикулярном к оптической и электрической осям, должны зависеть от размеров кристалла. Они выражаются формулой

$$\delta = K \frac{L}{e} V.$$

Отсюда видно, что, используя длинную, тонкую пластинку, можно было бы надеяться получить результат, гораздо более чувствительный, чем в случае расширения по направлению электрической оси.

При разности потенциалов, соответствующей искровому промежутку 1 мм в воздухе, и при $\frac{L}{e} = 100$, мы получили бы в мк расширение $\delta = 0.935$, т. е. около 1 мк или двух длин волн. Конечно, такое расширение можно измерить. Прибор, которым мы пользовались, состоял в основном из увеличительного рычага и из микроскопа, который служил для измерения смещений конца рычага. Длинная, тонкая кварцевая пластинка QQ (рис. 3), покрытая двумя оловянными листками, была расположена вертикально и закреплена снизу. Электрическая ось была горизонтальна и направлена по толщине пластинки; оптическая ось, также горизонтальная, перпендикулярна плоскости рисунка. В верхней части прикреплен наконечник из меди, заканчивающийся крючком.

Увеличительный рычаг ABD состоит из куска эбонита BD и из длинной стрелки AB, изготовленной из очень тонкого картона, и снабжен контрфорсом. В эбонит вделаны два ножа: первый опирается на неподвиж-

---

[5] Многие лица делали нам замечание, что пьезоэлектрический манометр, которым мы пользовались, можно было бы заменить оптическим манометром, состоящим из стеклянного параллелепипеда, двойное преломление которого изменялось бы под действием давления. Это совершенно верно, но такой оптический манометр был бы несравнимо менее чувствителен, чем пьезоэлектрический манометр. Действительно, согласно работам Вертгейма [[7]], чувствительность стеклянного параллелепипеда зависит только от поперечных размеров, которые должны быть сколь возможно малы; но их нельзя брать меньше 2 см, не подвергая опасности устойчивость столбика, зажатого в пресс.

Разность хода в одну длину волны будет достигаться давлением 320 кг; принимая, что надо иметь возможность отсчитывать $^1/_{100}$ полосы по компенсатору Бабине, мы получили бы манометр, чувствительный до 3 кг.

Пьезоэлектрический манометр примерно в 600 раз более чувствителен и дает уже некоторые показания при давлении 5 г.

ную плоскость, как нож весов; второй, обращенный острием вверх, опирается на крючок, присоединенный к концу кварцевой пластинки.

К концу стрелки приклеена стеклянная пластинка и к ней в свою очередь приклеена паутинка. Горизонтально расположенный микроскоп наведен на эту стеклянную пластинку. На какое бы место ее ни наводился микроскоп, всегда удается найти на паутинке подходящую для наблюдения метку. Отклонения отсчитываются по окулярному микрометру, который был предварительно проградуирован по микрометру с делениями $^{1}/_{100}$ мм, помещенному перед объективом.

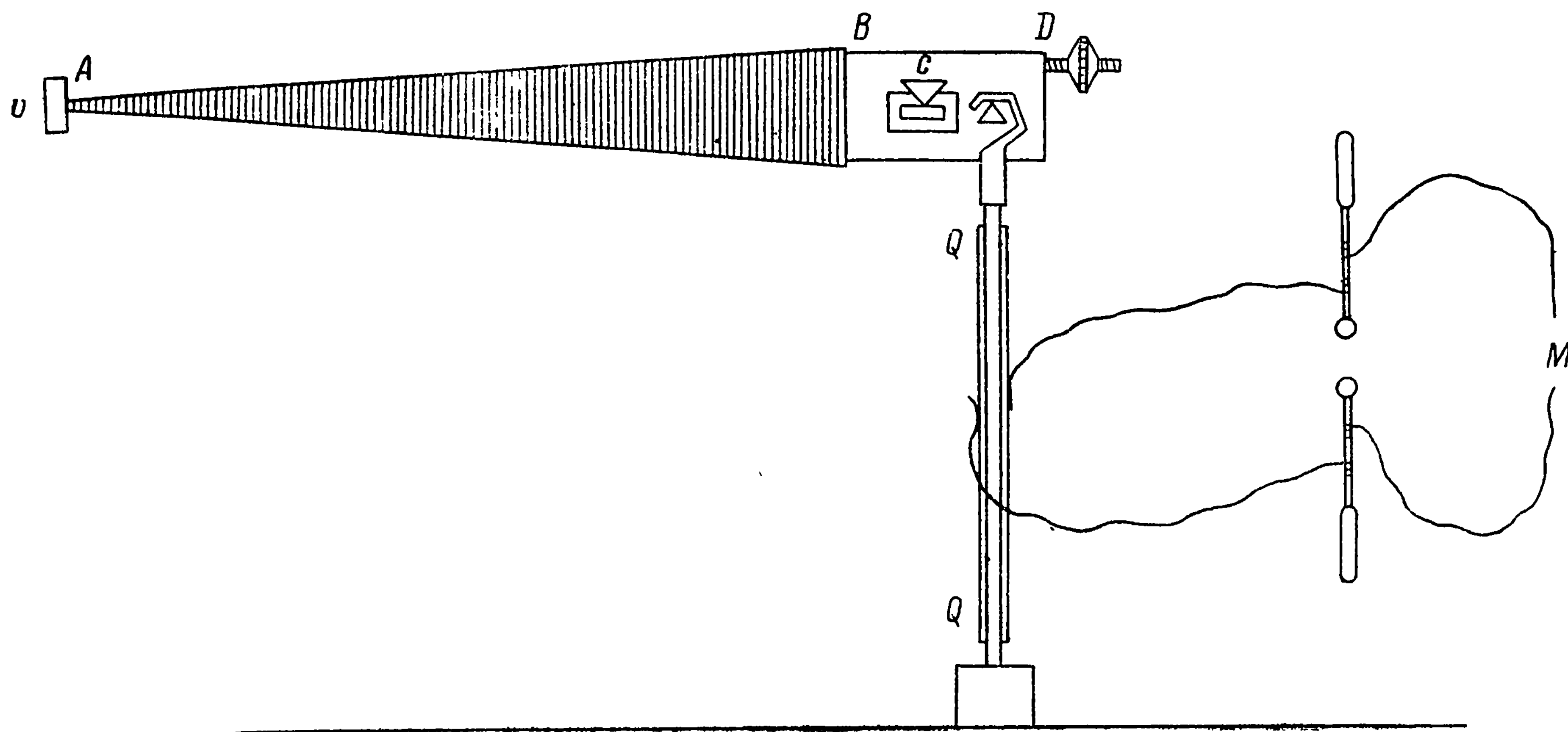


Рис. 3.

Расстояние между лезвиями обоих ножей составляло 8 мм. Длина стрелки менялась от 30 до 60 см. Чтобы произвести измерение, обе оловянные обкладки соединяют с машиной Гольца, батареей и микрометром с шариками. Пускают в ход машину; изменение потенциала и смещение стрелки происходят медленно. Это смещение отмечают по микрометру в момент, когда проскакивает искра.

Проверка теории была благоприятной в отношении знака явления и в отношении пропорциональности смещений потенциалу; однако эта последняя проверка была недостаточно точна вследствие малых размеров шкалы имевшегося в нашем распоряжении окулярного микрометра.

Что касается численной проверки, то некоторое осложнение получалось ввиду необходимости принимать экспериментальные предосторожности, чтобы можно было работать при высоких потенциалах машины Гольца и избежать проскакивания искры от одной стороны пластинок кварца к другой в обход поверхности. Опыты были проведены с тремя различными пластинками; две первые были покрыты тонким слоем аркансона, а третья, помещенная между двумя пластинками слюды, чрезвычайно тонкая, была

залита канадским бальзамом. Кроме того, оловянные листочки всех трех пластинок достигали края.

В этих условиях почти нельзя было оценить возможные потери в производимых действиях и подсчитать расширение, исходя из толщины пластинки, длины используемых листочков олова и из известного значения пьезоэлектрической постоянной.

Однако теория Липпмана применима, в частности, ко всякой, полностью оснащенной пластинке, и поэтому, чтобы можно было подсчитать соответствующие электрические расширения, достаточно определить величину пьезоэлектрического действия каждой пластинки, не заботясь о ее размерах.

Величина пьезоэлектрических действий определялась по натяжению, необходимому для зарядки конденсатора известной емкости до потенциала 1 даниель с помощью одной из пластинок. Для этой цели полностью оснащенную пластинку повертывали крючком книзу и подвешивали прямо к ней такие грузы, которые необходимы для получения желаемого выделения зарядов.

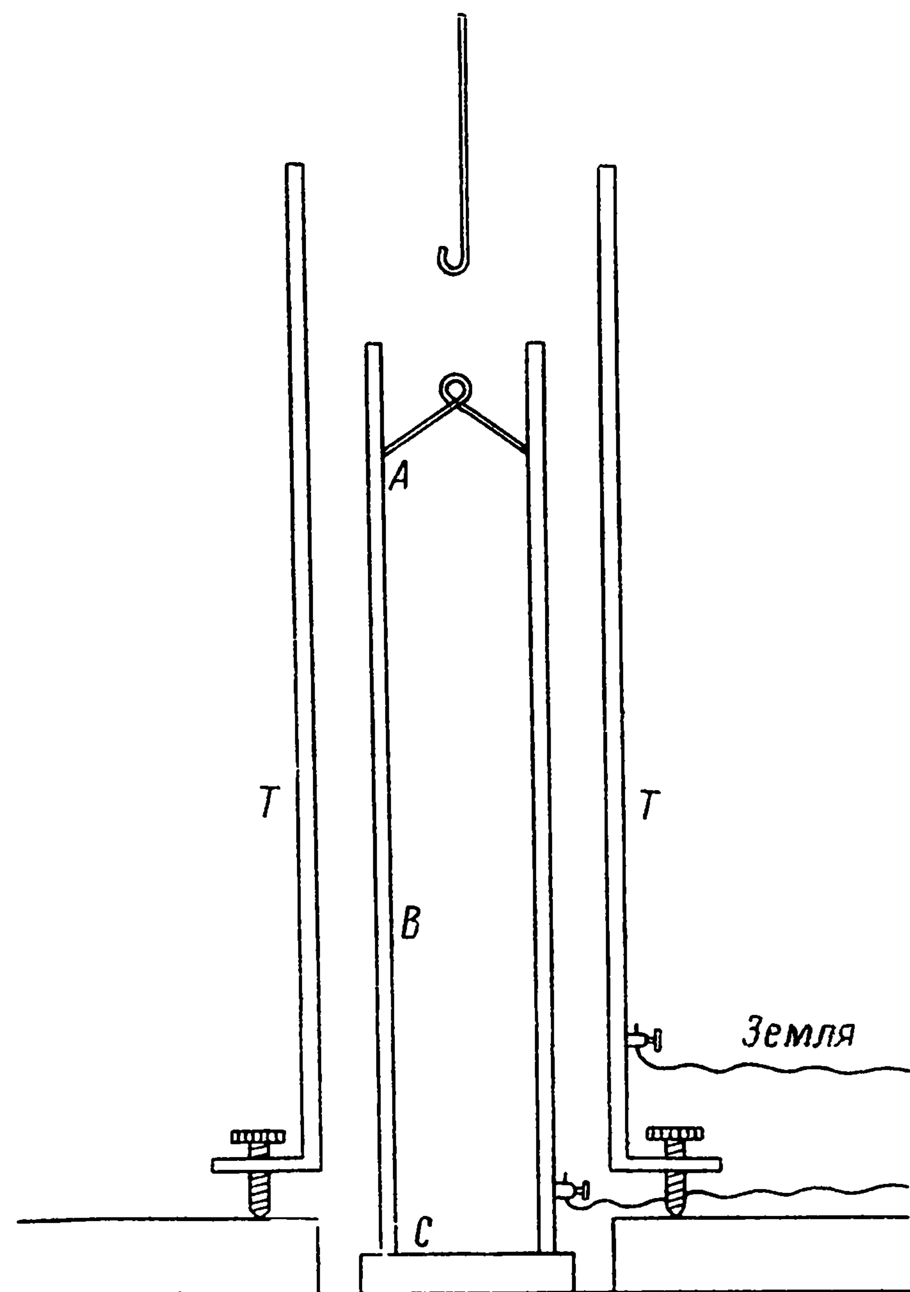


Рис. 4.

Абсолютным конденсатором служил в этих опытах цилиндрический конденсатор. Внутренний цилиндр ABC (рис. 4) состоял из двух частей, соединяющихся одна с другою в сечении B. Первый опыт проводят с двумя частями, затем второй опыт — убрав верхнюю часть; разность двух измерений должна соответствовать емкости, которую можно подсчитать по размерам подвижной части, как если бы она составляла часть бесконечного цилиндра.

Погрешность, обусловленная наличием свободного конца, одинакова в двух опытах и исключается из этой разности.

Конденсатор[6] имел следующие размеры:

Длина подвижной части, см	20.06
Внешний радиус цилиндра, см	6.603
Внутренний радиус большого цилиндра, см	8.070
Отсюда вычисленная емкость подвижной части	C = 49.99

[6] Тот же конденсатор нам служил для определения пьезоэлектрической постоянной кварца. В новых опытах, произведенных со значительно более совершенным

Результаты, полученные для трех кварцевых пластин:

	Пластины		
	I	II	III
Приблизительная используемая длина оловянной обкладки, см	2.8	4.0	4.0
Толщина, см	0.24	0.065	0.112
Растягивающее усилие, требуемое для заряжения емкости в 50 см до напряжения 1 даниель, г	258	48.5	78.0
Отсюда растягивающее усилие в 1 дину выделяет абсолютное количество электричества, равное[7]	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$39.3 \cdot 10^{-7}$	$22.3 \cdot 10^{-7}$
Отсюда растяжение, вычисленное для разности потенциалов, равной единице	$7.39 \cdot 10^{-7}$	$39.3 \cdot 10^{-7}$	$22.3 \cdot 10^{-7}$
Отсюда расширение, вычисленное в мм для разности потенциалов, равной 14.8,[8] соответствующей искре в 1 мм в воздухе между шариками диаметром 6 см	—	0.00058	0.000330
То же для разности потенциалов в 65.2 (искра в 6 мм)	0.00048	—	—
Смещение конца рычага, выраженное в делениях окулярного микрометра при напряжении, соответствующем искре в 1 мм	—	6.70	6.70
Смещение для напряжения в 6 мм	5.0	—	—
Одно деление окулярного микрометра составляет в мм под объективом	0.00413	0.00413	0.00361
Смещение в мм конца рычага	0.0206	0.0276	0.0242
Отношение плеч рычага	40.8	46.5	77.3
Отсюда измеренное расширение пластинки	0.00050	0.00061	0.000313

Итак, получено:

Измеренные расширения	0.00050	0.00061	0.000313
Вычисленные расширения	0.00048	0.00058	0.000330
Относительные ошибки	$+^1/_{25}$	$+^1/_{25}$	$-^1/_{19}$

Эти результаты следует признать удовлетворительными; ошибки едва превосходят погрешности отсчета по окулярному микрометру.

В ходе этого исследования мы пришли к убеждению, что явления пьезоэлектричества и электрического расширения должны быть причислены к самым закономерным и что изложенные здесь измерения могли бы успешно достичь значительно более высокой точности, чем та, которой мы располагали, пользуясь описанными нами приборами.

плоским конденсатором, снабженным защитным кольцом, мы получили полное удовлетворение, найдя почти то же самое число для пьезоэлектрической постоянной.

[7] Принимая 0.00374 за абсолютное значение напряжения 1 даниель.

[8] Согласно измерениям Байя (J. Baille, Ann. de chim. et de phys., 25, 486, 1882).

Опыты с двумя склеенными кварцевыми пластинками; электрометр с бипластинкой кварца

Нам удалось достичь значительно большей чувствительности в наблюдении электрических растяжений, используя тот же прием, который положен в основу металлического термометра Брегэ.

И здесь наблюдаемые эффекты должны быть приписаны упругим силам, возникающим при противодействии свободным растяжениям пластинок.

Две пластинки вырезаются параллельно из одного куска кварца и нормально к электрической оси; они имеют вид удлиненного прямоугольника. Ширина пластинок (малая сторона прямоугольника) параллельна оптической оси, а длина их перпендикулярна одновременно и оптической и электрической осям. Такие две одинаковые пластинки были вместе прошлифованы на оптическом станке до толщины в несколько сотых миллиметра; затем они были склеены одна с другой канадским бальзамом. Прежде чем была проделана эта последняя операция, надо было осторожно повернуть одну из пластинок так, чтобы их электрические оси (направленные параллельно толщине) были в обеих пластинках направлены в противоположные стороны. Таким образом получается бипластинка (bilame); внешние грани ее серебрятся.

Если теперь приложить некоторую разность потенциалов между этими двумя посеребренными поверхностями, тогда одна из пластин будет стремиться удлиниться, а другая — сократиться. Так как пластинки склеены между собой, это приведет к изгибу бипластинки, причем выпуклость будет находиться со стороны удлиняющейся пластинки.

Для изучения этого явления мы закрепили один из концов бипластинки и наблюдали в микроскоп смещение другого конца. Это смещение можно еще увеличить, если к этому концу прикрепить длинную, легкую стрелку. Можно также наблюдать изгиб с помощью маленького зеркальца, приклеенного к концу бипластинки. В опытах с тонкими длинными пластинками и при достаточно большом электрическом напряжении этот изгиб виден и невооруженным глазом.

Бипластинку, чувствительную к изгибам под действием электричества, можно также получить, склеив две пластинки без повертывания одной из них; надо только перед склейкой посеребрить также соприкасающиеся грани пластинок; таким путем получается бипластинка с тремя слоями серебра — одним внутренним и двумя наружными. Эти два последние электрически соединены между собой и заземлены; внутреннюю же посеребренную поверхность, находящуюся между двух пластин, поддерживают при некотором потенциале. В этом опыте электрические оси имеют одинаковое направление в обеих пластинках, но действующие в них электрические поля имеют противоположные направления. Результат будет такой же, что и в предыдущем случае; одна из пластинок расширяется,

другая сокращается, а бипластинка изгибается. Такое расположение даже предпочтительнее, чем первое, так как при тех же пластинках и при том же напряжении получаем в два раза большую чувствительность.

Легко проанализировать, что происходит внутри бипластинки, если ограничиться только первым приближением. Обозначим через L общую длину обеих кварцевых пластинок. Если бы обе пластинки были совершенно свободны, то при помещении их в электрическое поле возникло бы удлинение δ первой пластинки и укорочение δ второй, так что длины обеих пластинок отличались бы между собой па 2δ, но так как пластинки не свободны, этого не получится, и бипластинка изогнется под действием упругих сил.

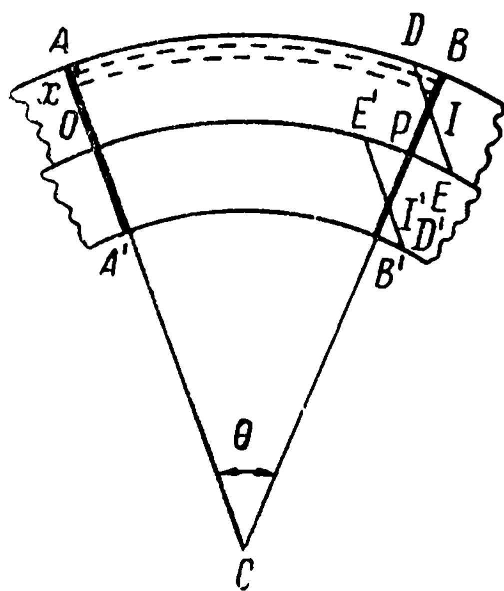


Рис. 5.

Рис. 5 представляет собой продольный разрез, перпендикулярный граням, части бипластинки $AA'BB'$.

Предположим, что когда волокна, параллельные длине бипластинки, изгибаются, то сечения, которые первоначально были перпендикулярны им, остаются все время перпендикулярными и при изгибе (это условие необходимо, если пластинка очень длинна по сравнению с толщиной).

Пусть:

AA' — сечение, перпендикулярное к продольным волокнам;

BB' — нормальное сечение, бесконечно близкое к первому;

l — расстояние между этими двумя сечениями, отсчитываемое по среднему волокну;

R — радиус кривизны бипластинки.

Если бы продольные волокна, заключенные между OA и PB, были избавлены от действия продольных упругих сил и могли бы сокращаться или растягиваться с сохранением своей кривизны и если бы одни из концов этих волокон были закреплены в плоскости OA, то противоположные концы расположились бы все в одной и той же плоскости DE, параллельной OA.

Расстояния, отсчитанные вдоль каждого волокна между BP и DE, позволяют найти для каждого волокна механическое усилие, которое оно испытывает при изгибе.

Точно так же концы волокон, заключенных между OA' и PB', оказались бы в плоскости $E'D'$, параллельной OA', если бы они не подвергались механическим усилиям.

Пусть I и I' — места пересечения плоскостей DE, PB, с одной стороны, и плоскостей $D'E'$, $P'B'$ — с другой.

Если эти линии I и I' находятся внутри пластин, то волокна, оканчивающиеся на I и I', не испытывают никакого механического усилия.

В противном случае все волокна испытывают некоторое продольное усилие.

Часть, расположенная влево от плоскости AA, находится в равновесии под действием нормальных упругих сил, действующих через плоскость AA', следовательно:

1. Сумма упругих сил, нормальных к плоскости AB, равна нулю, и мы имеем

$$\Sigma \text{ упругих сил на } OA = \Sigma \text{ упругих сил на } OA'.$$

Если точки I и I' находятся на одном и том же расстоянии a от каждой стороны поверхности раздела OP двух пластинок, то очевидно (в предположении очень малого изгиба и при пренебрежении величинами второго порядка), что волокна каждой пластинки попарно симметрично соответствуют друг другу и дают равные и противоположные по знаку усилия.

Таким образом, написанное выше равенство удовлетворяется в этом и только в этом случае.

Итак, имеем

$$PI = PI' = a.$$

2. Сумма моментов упругих тел, действующих на AA', относительно оси, проходящей через O и нормальной к плоскости рисунка, должна быть равна нулю.

Пусть x есть переменное расстояние Ox волокна dx от средней поверхности OP. Два слоя толщины dx, расположенные на расстояниях $+x$ и $-x$ от средней плоскости OP, имеют равные и одинаковые по знаку моменты. Отсюда вытекает, что суммы моментов упругих сил, соответствующих каждой из двух пластинок, должны быть равны нулю каждая в отдельности.

Обозначим через e толщину одной из пластинок, через l — среднюю длину волокон, через θ — угол между двумя плоскостями AA' и BB', через E — коэффициент упругости кварца в рассматриваемом направлении, расширение, вызванное упругими силами одного волокна на единицу длины, будет

$$\frac{\theta (x - a)}{l},$$

тогда имеем

$$\frac{E\theta}{l} \int_0^e x(a - x)\, dx = 0 \quad \text{или} \quad \frac{ae^2}{2} - \frac{e^3}{3} = 0,$$

откуда

$$a = \frac{2}{3} e.$$

Таким образом, точки I и I' расположены внутри пластинок на расстоянии двух третей толщины каждой из них от плоскости раздела.

Слои, находящиеся на расстоянии двух третей толщины каждой пластинки, не испытывают никаких упругих усилий, поэтому они имеют свои нормальные длины $L+\delta$ и $L-\delta$. Под действием электрических полей получается

$$\frac{R-\frac{2}{3}e}{R+\frac{2}{3}e}=\frac{L-\delta}{L+\delta}, \quad \text{откуда} \quad \frac{1}{R}=\frac{3}{2}\frac{\delta}{eL}.$$

Эта кривизна всюду одинакова; как мы видим, она не зависит от величины коэффициента упругости вещества.

Положим, что мы имеем дело со случаем бипластинки с внутренним посеребрением, где напряжение подведено к центру; мы имеем

$$\delta=K\frac{L}{e}V,$$

где V — разность потенциалов между двумя поверхностями бипластинки; тогда имеем

$$\frac{1}{R}=\frac{3}{2}\frac{KV}{e^2}.$$

Полная кривизна α, т. е. угол, на который повернулось бы зеркальце, помещенное у конца пластинки, при наложении разности потенциалов, выражается

$$\alpha=\frac{3}{2}K\frac{L}{e^2}V,$$

и боковое смещение конца пластинки будет

$$z=\frac{3}{4}K\frac{L^2}{e^2}V.$$

Если, наконец, добавим к концу пластинки стрелку длиной λ, то эта стрелка повернется вокруг неподвижной точки, расположенной на половине длины пластинки; для смещения конца стрелки будем иметь

$$z'=\frac{\lambda+\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}}\cdot\frac{3}{4}K\frac{L^2}{e^2}V,$$

где $K=6.32\cdot 10^{-8}$.

Мы видим, что можно заранее вычислить чувствительность электрометра, основанного на этом принципе, и что можно подобрать толщину бипластинки так, чтобы обеспечить желаемую величину этой чувствительности.

Предшествующая формула дает лишь первое приближение. Она несовершенна как с упругой, так и с электрической точек зрения. Мы, например, пренебрегли электричеством, распределенным по объему внутри пластинки. Так как в действительности последние испытывают неоднородную деформацию, то в результате в объеме пластинок вследствие пьезоэлектрических свойств вещества образуется некоторая плотность электричества. Это электричество должно влиять и тем самым несколько изменять напряженность поля, поэтому предыдущие формулы не являются абсолютно точными [8].

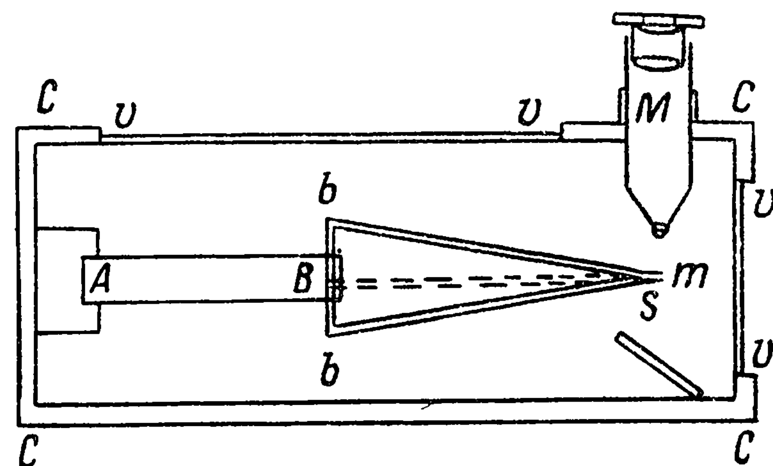


Рис. 6.

Рис. 6 и 7 представляют собой вертикальный и горизонтальный разрезы прибора, построенного нами на вышеописанном принципе,

Бипластинка AB, поддерживаемая неподвижно в точке A, помещена в ящик $CCCC$ с двумя стеклянными окошками $vvvv$. Стрелка (bbs, $b'b's$) служит для увеличения смещения конца бипластинки; она представляет собой ферму из стеклянных нитей, расположенных по ребрам четырехгранной пирамиды; такая стрелка очень легка и в то же время очень жестка. Приклеенная в точке B к бипластинке стрелка несет на другом конце в точке s микрометр mm с точностью отсчета $^1/_{30}$ мм. Этот микрометр получен фотографически, он имеет штрихи и цифры. Неподвижный микроскоп M, снабженный отсчетной сеткой, позволяет отсчитывать отклонения по микрометру.

Прибор предназначен только для измерения высоких потенциалов. Как мы видели, чувствительность зависит от толщины бипластинки. Мы воспользовались помощью талантливого оптика Верлейна, которому удалось изготовить бипластинки толщиной $^1/_{15}$ мм (т. е. по $^1/_{30}$ мм на каждую пластинку) при длине 8 см.

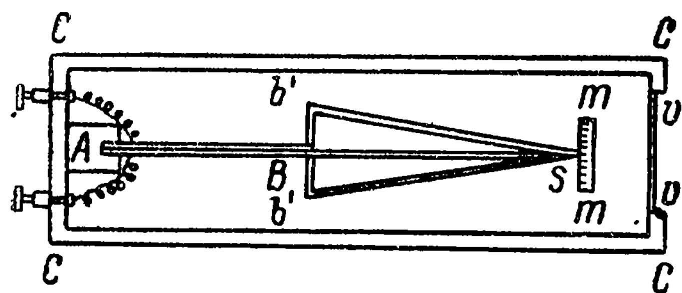


Рис. 7.

Практически приходится довольствоваться бипластинками толщиной не менее $^1/_8$ мм. Мы получили, таким образом, приборы с чувствительностью около 5 в, которыми можно пользоваться до 1000 или 1500 в.

С бипластинками толщиной 1 мм получаются электрометры, которыми можно пользоваться для измерения напряжений в 50 000 в с точностью до 200 в.

Первая чувствительность пригодна для измерения разности потенциалов батарей элементов, батарей аккумуляторов, динамомашин постоянного тока.

Вторая чувствительность подходит для измерения высоких потенциалов электростатических машин.

Отсчеты производятся очень быстро, а изоляция получается очень хорошей благодаря особенностям проводящих свойств кварца; действительно, как показал один из нас, кварц, который обладает весьма заметной проводимостью в направлении оптической оси, не проводит электричество в направлении, перпендикулярном к этой оси.



СИММЕТРИЯ.
КРИСТАЛЛОГРАФИЯ



IX

О ВОПРОСАХ УПОРЯДОЧЕННОСТИ: ПОВТОРЯЕМОСТЬ [1]

I

В своем мемуаре о многогранниках симметричной формы Бравэ сгруппировал их в 23 семейства, исходя из рассмотрения упорядоченности и симметрии системы точек, образованной их вершинами [2].

Классификация Бравэ применима также ко всем конечным системам, образованным конечным числом точек.

Я поставил себе целью классифицировать произвольные системы точек, наделенных какими-нибудь свойствами, по их типу повторяемости и симметрии. Эта общая проблема непосредственно интересует физику, химию и кристаллографию.

Число точек тех систем, которые мы будем рассматривать, может быть неограниченным. Точки могут быть наделены свойствами, не связанными с представлениями о направлении, такими, как плотность, температура; либо связанными со свойствами, определения которых содержат разного рода представления о сторонности и о направленности (такие, как скорости, силы, напряженности электрического или магнитного полей, интенсивности вращательной способности и т. д.).

Хотя эта проблема является значительно более общей, чем проблема, рассмотренная Бравэ, но данная им классификация в значительной мере применима и здесь; он в своей работе разрешил главные трудности; тем не менее необходимо снова поднять этот вопрос во всей его полноте.

Упорядоченность в некоторой системе может проявляться двумя совершенно разными способами; есть основание для различия *повторяемости* и *симметрии*.

1. Различные части системы могут быть повторениями одна другой такого рода, что некоторые перемещения всей системы оставляют все в состоянии, тождественном первоначальному состоянию в фиксированных точках пространства. Мы имеем тогда некоторую систему повторяемости.

Перемещения, о которых мы говорим, мы назовем *индифферентными перемещениями* [3].

2. Пусть имеется некоторая система и существует другая система, такая, что сравнение этих двух систем дает одновременно представления о равенстве и о противоположности; точки обеих систем соответствуют друг другу, расстояния между соответствующими точками одинаковы, все размеры те же самые, и все же системы, вообще говоря, не тождественны и не могут быть совмещены одна с другой. Такие две системы называются *симметричными одна другой*.

Может, однако, случиться, что точки некоторой системы расположены таким образом и обладают такими свойствами, что эта система не имеет симметричной ей системы, или же, что она тождественна той системе, которую мы получим, если будем строить симметричную ей систему обычными методами.

Тогда говорят, что система сама по себе есть система *симметричная*.

Таким образом, системы могут обладать или не обладать повторяемостями, они могут быть или не быть симметричными; это совершенно разные свойства; системы могут быть наделены тем или иным из этих свойств в отдельности или обоими одновременно, и мы увидим, что все виды повторяемости могут существовать вместе с симметрией или без нее. Мы разберем, однако, вопросы повторяемости отдельно от вопросов симметрии, отложив их сличение на будущее время [4]. В том общем вопросе, которым мы занимаемся, такое разделение особенно полезно; классификацию повторяемостей в действительности можно провести, не учитывая природы свойств, которыми наделены точки. Все это основано на следующем замечании Бравэ: повторяемость, получающаяся в результате некоторого индифферентного перемещения системы, влечет за собой целый ряд других индифферентных перемещений и новых повторяемостей; природа того, что повторяется, не входит в эти рассуждения.

В вопросах симметрии, напротив, возникнут основания, чтобы ввести в рассмотрение свойства точек и определить симметрию точки, наделенной тем свойством, которое мы пожелаем ей приписать.

Все нижеследующее относится к повторяемостям вокруг некоторой точки в ограниченной или неограниченной системе.

II. Определения

3. *Система n-го порядка.* Дана некоторая система, которую будем считать неподвижной в пространстве. Представим себе вторую систему, тождественную первой, могущую перемещаться как одно целое без каких-либо изменений. Может случиться, что при некоторых положениях системы в пространстве подвижная система накладывается и совмещается с неподвижной системой. В этих положениях будет иметь место совпадение обеих систем.

Мы назовем *системой повторяемости n-го порядка* такую систему, для которой совпадение имеет место при n различных положениях подвижной системы. Можно также сказать, что система повторяемости n-го порядка есть система, которая допускает $(n—1)$ различных *индифферентных перемещений* (п. 2).

4. *Гомологичные точки, центры повторяемости*. Все точки неподвижной системы, которые будут совмещаться с одной и той же точкой подвижной системы при различных совпадениях обеих систем, суть *прямо гомологичные точки*.

Если некоторая точка неподвижной системы совпадает с одной и той же точкой подвижной системы при q различных положениях обеих систем, то эта точка будет q раз гомологична самой себе; она будет *центром повторяемости q-го порядка*.

Можно сказать и так: некоторая точка будет *центром повторяемости q-го порядка*, если, перемещая подвижную систему и оставляя эту точку неподвижной, мы найдем q различных положений, при которых обе системы будут совпадать.

Гомологичные точки и гомологичные центры повторяемости суть *точки и центры повторяемости одного и того же рода* [5].

5. *Гомологичные прямые, двусторонние прямые, оси повторяемости*. Все прямые неподвижной системы, которые при совмещениях двух систем будут совпадать с одной и той же прямой, имеющей определенное направление и принадлежащей к подвижной системе, будут *прямо гомологичными прямыми*.

Исходя из соображений стройности изложения, целесообразно каждой прямой присваивать некоторое *направление* и в этом смысле пользоваться словом «*прямая*». На некоторой *прямой линии* мы имеем две *прямые* противоположных направлений, которые мы можем назвать *прямыми, обратными* одна другой. Таким образом, когда говорят, что две прямые гомологичны, то это значит, что определенное направление одной прямой линии гомологично определенному направлению другой прямой линии.

Если мы имеем гомологичные между собой прямые, то прямые, обратные этим (т. е. такие, которые совпадают с первыми, но имеют противоположные направления), также гомологичны между собой. Когда эти прямые совмещаются с одной и той же прямой подвижной системы, то обратные им прямые совмещаются с прямой, обратной этой прямой подвижной системы.

Некоторая прямая может быть гомологична своей обратной прямой. Для этого достаточно, чтобы при двух совпадениях обеих систем одна и та же прямая линия неподвижной системы совмещалась в двух различных направлениях с одной и той же прямой определенного направления подвижной системы.

Мы назовем тогда совокупность двух таких гомологичных прямых *двусторонней прямой*.

Угол между двумя прямыми, имеющими определенное направление, изменяется от 0 до 180°. Две прямые имеют одну единственную биссектрису.

Если некоторая прямая неподвижной системы совмещается с одной и той же прямой подвижной системы при n различных совпадениях обеих систем, то эта прямая тогда будет n раз гомологична сама себе.

Некоторая прямая будет *осью повторяемости q-го порядка*, если, поворачивая подвижную систему вокруг этой прямой, мы найдем q различных положений, при которых обе системы совпадают.

Гомологичные прямые суть прямые одного и того же рода. Некоторая точка будет *главным центром повторяемости*, если она будет точкой пересечения нескольких осей.

6. Теорема. *Гомологичные точки, гомологичные прямые обладают одинаковыми особенностями, и всякое свойство точки или прямой влечет за собой существование такого же свойства у гомологичных точек и прямых.*

Центры розы, оси розы, имеют гомологами центры розы, оси розы того же порядка и того же рода (гомологичны центры и оси) [6].

Если некоторая прямая вместе со своей обратной прямой составляет двустороннюю прямую, то все гомологичные прямые первой вместе с их обратными прямыми составляют двусторонние прямые; следовательно, если мы имеем p гомологичных прямых, их совокупность составит $^{p}/_{2}$ двусторонних прямых, и p по необходимости будет четным.

7. *Двусторонние оси.* Если некоторая прямая представляет собой ось повторяемости q-го порядка, то обратная ей прямая также есть ось повторяемости q-го порядка, однако, вообще говоря, ось другого рода.Если эти обе оси будут осями одного и того же рода, как это мы имеем в случае двусторонней прямой, то эти две оси составляют тогда *двустороннюю ось.* (Примеры: ось 3-го порядка правильного тетраэдра есть простая ось, а обратная ей ось есть ось 3-го порядка другого рода. Ось 3-го порядка куба есть двусторонняя ось).

Это понятие о направленности у гомологичных прямых, влекущее за собой рассмотрение двусторонних прямых и двусторонних осей, приводит нас к формулировке одной важной теоремы, ускользнувшей от Бравэ. Эта теорема связывает между собой число и порядок осей повторяемости, пересекающихся в одной точке (п. 8). Кроме того, формулировки некоторых теорем, бывшие до сих пор несколько ограниченными, становятся более общими.

III. Последовательный ход разделения по классам повторяемостей системы вокруг некоторой точки

Мы дадим прежде всего весьма подробное перечисление ряда положений, которые позволят установить такую классификацию. Доказательства положений, обозначенных звездочками (*), будут даны под теми же

номерами в IV части этой статьи. Остальные положения нам представляются не нуждающимися в пояснениях.

8*. Если система n-го порядка обладает p осями q-го порядка одного и того же рода, проходящими через одну и ту же точку, то необходимо будет иметь $pq=n$.

Для другой системы осей (p' осей q'-го порядка), проходящих через ту же точку, будем иметь $p'q'=n$, . . .

$$n = pq = p'q' = p''q'' = \ldots \qquad (1)$$

9*. Часть системы, примыкающая к какой-либо оси (т. е. та часть, которая содержит все линии, проходящие через центр и расположенные к этой оси ближе, чем к какой-либо другой оси того же рода), одинакова для каждой из p осей, и та ось, которую такая часть содержит, по отношению к ней есть ось q-го порядка.

10. Если некоторая система обладает осью q-го порядка, то различные индифферентные перемещения вокруг этой оси могут последовательно получаться путем последовательных поворотов на угол $2\pi/q$ (Бравэ).

11. Пространство вокруг оси q-го порядка можно разделить на q одинаковых между собой частей, ограниченных плоскостями, образующими между собой углы, равные $2\pi/q$.

12. Если некоторая система обладает p осями q-го порядка одного и того же рода, то каждую часть, примыкающую к одной из осей, можно разделить на q одинаковых частей (пп. 9 и 11).

Таким образом, вся система может быть разложена на n одинаковых частей (составные многогранные углы или *составные части*); при различных индифферентных перемещениях системы одна из составных частей последовательно занимает места всех других, никогда не совпадая дважды сама с собой.

13*. Различные оси системы непременно расположены на границах этих составных частей (п. 12).

14. *Биссекторная*, или *разделяющая*, *плоскость*, относящаяся к двум осям (мы назовем так плоскость, перпендикулярную плоскости обеих осей и проходящую через их биссектрису), разделяет систему на две части, каждая из которых содержит точки, расположенные ближе к той оси, которая в ней заключена, чем к другой оси.

15. Если провести все разделяющие плоскости, относящиеся к одной и той же оси, группируемой последовательно с каждой из осей того же рода, то мы построим все перегородки, которые необходимы при ограничении части, примыкающей к рассматриваемой оси.

16. Перемещение системы, одна точка которой остается неподвижной, всегда можно осуществить с помощью одного поворота на надлежащий угол около некоторой оси, подходящим образом выбранной и проходящей через эту точку (Эйлер).

17. Вид повторяемости будет полностью определяться содержащимися в ней осями (п. 16).

18. Для того чтобы некоторая совокупность осей, пересекающихся в одной точке, составляла некоторый вид повторяемости, необходимо и достаточно при построении этой совокупности осей получать *связную* совокупность, т. е. совокупность, в которой можно было бы осуществить все те индифферентные перемещения, которые предусмотрены этими осями, без необходимости вводить новые оси (п. 17).

19.* В биссекторной, или разделяющей, плоскости, соответствующей двум осям одного и того же рода и q-го порядка, всегда должно находиться по крайней мере q направлений осей, т. е. $2q$ осей (п. 16).

20. Если одна и та же плоскость содержит m осей четного порядка, то последовательные оси должны образовывать между собой углы, равные $\frac{2\pi}{m}$ (Бравэ).

21.* Нормаль к плоскости, образованной двумя осями 2-го порядка, есть всегда двусторонняя ось.

22.* Все случаи повторяемости сводятся к следующим четырем случаям:

1°. *Системы сфероэдрические.* Системы, имеющие оси одного рода, порядка выше 2-го, образующие между собой углы, отличные от π, представляют собой общий случай.

2°. *Системы с главными осями.* Системы, обладающие единственной двусторонней осью своего рода.

3°. *Системы с одним единственным направлением осей.* Системы, обладающие только одной осью и обратной ей осью, но другого рода.

4°. *Системы, имеющие оси бесконечного порядка, или бесконечное число осей.*

23. *Обозначения*:

KL^q — K осей q-го порядка одного и того же рода; Kl^q — обратные предыдущим; в обозначении (KL^q) скобки указывают на то, что K осей q-го порядка состоят из $\frac{K}{2}$ двусторонних осей;

C^n_R — главный центр повторяемости n-го порядка.

Случай сфероэдрических систем. (Системы, имеющие оси одного рода, порядка выше 2-го, образующие между собой углы, отличные от π).

24.* Поворотом разделяющей плоскости, относящейся к оси, вокруг которой совершается поворот, и наиболее близкой оси того же рода, мы получим около первой оси правильный многогранный угол, имеющий q граней.

25.* Ребра этого многогранника суть оси порядка выше 2-го и другого рода, чем рассмотренные раньше. (Назовем оси первого рода осями A, а оси второго рода — осями B).

26.* Рассматриваемый многогранный угол есть не что иное, как часть, примыкающая к этой оси A и содержащая ее.

27.* Биссектриса плоского угла многогранника есть ось 2-го порядка. (Назовем осями C оси этого рода).

28.* Не может существовать больше трех родов осей, и их всегда должно быть три, из которых одна есть ось C 2-го порядка, и две оси A и B порядка выше 2-го.

Пусть имеется p осей q-го порядка первого рода, p' осей q'-го порядка второго рода, p'' осей 2-го порядка третьего рода

$$n = pq = p'q' = p'' \cdot 2. \qquad (1')$$

29. Систему можно также разделить на p частей, примыкающих к осям A, или на p' частей, примыкающих к осям B.

Первые p частей могут быть разложены на q равнобедренных трехгранников, играющих роль составных частей системы; также и часть, примыкающая к одной из осей B, может быть разложена на q' равнобедренных трехгранника, отличных от предыдущих, но также играющих роль составных частей.

30. Вычисляя телесный угол ω одной из составных частей, с одной стороны, как часть сферы, а с другой стороны, с помощью двухгранных углов, мы найдем

$$\omega = \frac{4\pi}{n} = \left(\frac{1}{q} + \frac{1}{q'} - \frac{1}{2}\right) 2\pi \quad \text{(Маллар) [7].} \qquad (2)$$

Этот угол ω не может быть равен нулю; мы получаем тогда неравенства

$$\frac{1}{q} + \frac{1}{q'} - \frac{1}{2} > 0, \quad q \geqq 3, \quad q' \geqq 3$$

как возможные условия для q и q'.

Единственные возможные случаи суть:

$q' = 3$ и $q = 3$, $\quad q' = 4$ и $q = 3$,
$q' = 3$ и $q = 4$, $\quad q' = 5$ и $q = 3$.
$q' = 3$ и $q = 5$,

Два последних случая не отличаются от двух предыдущих. В сфероэдрических системах все оси имеют порядок ниже 6 (Бравэ) [8].

31. Если воспользоваться уравнениями (2) и (1), то мы придем к следующим трем типам, как единственно возможным.

Группа	q	q'	n	p	p'	p''	
1-я	3	3	12	4	4	6	$4L^3$, $4l^3$, $(6L^2)$, C_R^{12},
2-я	4	3	24	6	8	12	$(6L^4)$, $(8L^3)$, $(12L^2)$, C_R^{24},
3-я	5	3	60	12	20	30	$(12L^5)$, $(20L^3)$, $(30L^2)$, C_R^{60}.

32.* Двойные оси трех групп и все оси обеих последних групп должны быть двусторонними. Оси 3-го порядка первой группы, напротив, суть простые оси и оси обоих родов осей 3-го порядка этой группы суть обратные одна другой.

33. У этих трех рассмотренных нами видов всегда можно построить правильный многогранный угол, играющий роль многогранника, примыкающего к одной из осей. Такой многогранник с телесным углом $4\ \pi/p$ и двугранным углом $\frac{2\pi}{q'}$ будет единственным.

34.* С помощью предыдущего многогранного угла всегда можно построить некоторую связанную систему. Эта система будет единственной.

Таким образом, три рассмотренных прежде вида существуют и каждому из них соответствует только одна система.

35. *Системы с главными осями.* (Системы, обладающие единственной в своем роде осью).

36. Части, примыкающие к каждой из осей, содержат все направления, соответствующие полусфере.

37. Другие оси системы могут находиться только в плоскости, перпендикулярной первой оси и разделяющей обе полусферы.

38. Все эти оси суть оси 2-го порядка, их число должно быть равно $2q$ (q есть порядок двусторонней оси).

Эти оси 2-го порядка суть оси двух родов, по q осей каждого рода. Последовательные оси образуют между собой равные углы и представляют собой оси разного рода.

Общее обозначение: $(2L^q)$, qL'^2, qL''^2, C_R^{2q}.

Когда q четное, то оси 2-го порядка суть оси двусторонние; когда же q нечетное, то они суть простые оси, и ось одного рода имеет осью обратной себе ось другого рода.

Двусторонние оси могут быть осями какого угодно порядка.

39. *Системы с одним единственным направлением осей. Системы, обладающие одной единственной осью и обратной ей.*

Такая система, содержащая, очевидно, только один вид, может существовать, и эта ось может быть любого порядка L^q, l^q, C_R^q.

40. *Случай осей бесконечного порядка или бесконечного числа осей.* Если имеется два направления оси бесконечного порядка (оси *изотропии*), не образующих двусторонней оси, то все прямые суть оси бесконечного порядка того же рода. Это есть случай сферических систем (∞L^∞), C_R^∞.

41. Если существует только одна двусторонняя ось изотропии, то другие оси, которые могут и должны существовать, суть оси 2-го порядка, число их бесконечно и расположены они в плоскости, перпендикулярной оси изотропии (п. 19).

В одном частном случае имеем, очевидно, системы с главными осями $(2L^{\infty})(\infty L^2)\, C^{\infty}_{R}$.

42. Может также существовать только одна ось изотропии и обратная ей ось другого рода. Частный случай систем с одним единственным направлением оси L^{∞}, l^{∞}, C^{∞}_{R}.

43.* Не может существовать бесконечного числа осей конечного порядка выше 2-го.

44.* Если имеется бесконечное число осей 2-го порядка, то единственный возможный случай — это системы с одной единственной осью изотропии (п. 41).

45. *Общие замечания.* Биссектриса угла между двумя ближайшими осями одного и того же рода порядка выше 2-го есть всегда ось 2-го порядка (п. 27 *бис*).

46. Уравнения

$$n = pq = p'q' = p'' \cdot 2 \qquad (1)$$

и

$$\omega = \frac{4\pi}{n} = \left(\frac{1}{q} + \frac{1}{q'} - \frac{1}{2}\right) 2\pi$$

или

$$\frac{2}{n} = \frac{1}{q} + \frac{1}{q'} - \frac{1}{2} \qquad (2)$$

имеют общее значение для всех систем с несколькими направлениями осей [9]. Из этих уравнений выводим следующие:

$$p + p' - p'' = 2, \qquad (3)$$

$$p + p' = \frac{n}{2} + 2. \qquad (4)$$

47. Обратно, всем решениям системы неопределенных уравнений (1) и (2), или эквивалентной ей системы (1) и (4), отвечают виды осей, пересекающихся в одной и той же точке.

Итак, *исследование различных случаев повторяемости вокруг некоторой точки может быть сведено к решению неопределенных уравнений.*

$$n = pq = p'q', \qquad (1)$$

$$p + p' = \frac{n}{2} + 2, \qquad (4)$$

другими словами к следующей задаче:

Найти такое число и два его множителя, чтобы сумма обоих множителей была равна половине этого числа плюс два.

Классификация систем повторяемости

[Системы]	[Классы]	Порядок осей q	Порядок осей q'	Порядок осей q''	Порядок системы n	Число осей p	Число осей p'	Число осей p''	[Примеры фигур]
Системы сферические.	Класс I (∞L^{∞}), C_R^{∞}	∞	—	—	∞	∞	—	—	Сфера.
Системы сфероэдрические.	Класс II $4L^3$, $4l^3$, $(6L'^2)$, C_R^{12}	3	3	2	12	4	4	6	Правильный тетраэдр.
	Класс III $(6L^4)$, $(8L'^3)$, $(12L''^2)$, C_R^{24}	4	3	2	24	6	8	12	Куб, октаэдр.
	Класс IV $(12L^5)$, $(20L'^3)$, $(30L''^2)$, C_R^{60}	5	3	2	60	12	20	30	Правильный додекаэдр, икосаэдр.
Системы с главными осями $(2L_q)$, qL'^2, qL''^2.	Класс V q четное, $q = 2k$	2	2	2	4	2	2	2	Прямоугольный параллелепипед.
		4	2	2	8	2	4	4	
		6	2	2	12	2	6	6	Кристаллическая форма изумруда.
		$2k$	2	2	$4k$	2	$2k$	$2k$	
	Класс VI q нечетное, $y = 2k + 1$	3	2	2	6	2	3	3	Кристаллическая форма кварца.
		5	2	2	10	2	5	5	
		$2k + 1$	2	2	$2(2k + 1)$	2	$(2k + 1)$	$(2k + 1)$	
	Класс VII $q = \infty$	∞	2	—	∞	2	∞	—	Цилиндр.
Системы с одним единственным направлением осей.	Класс VIII L_q, l_q, C_R^q	2	2	—	2	1	1	—	Кристаллическая форма турмалина.
		3	3	—	3	1	1	—	
		q	q	—	q	1	1	—	
	Класс IX L^{∞}, l^{∞}, C_R^{∞}	∞	∞	—	∞	1	1	—	Усеченный конус, электрическое поле.
Системы без проверяемости.	Класс X $0L$, $0C$	—	—	—	0	—	—	—	—

48. Разыскание различных видов повторяемости вокруг некоторой точки совпадает также с разысканием различных способов разделения пространства вокруг этой точки на правильные, равные многогранные углы (Бравэ).

49. Уравнение

$$p + p' = p'' + 2 \tag{3}$$

для некоторых многогранников совпадает с формулой Эйлера

$$F + S = A + 2,$$

связывающей между собой число граней (F), вершин (S) и ребер (A).

50. *Установленная классификация применима ко всем ограниченным системам.* Всегда можно заставить систему перейти из одного положения в пространстве в любое другое с помощью поворота вокруг некоторой определенной прямой и последующего скольжения, совершаемого параллельно этой же прямой. Это скольжение влечет за собой перемещение всех точек системы (Шаль).

51. Если некоторое индифферентное перемещение может получиться путем простого скольжения или скольжения, сопровождаемого поворотом, осуществляемым вокруг прямой, параллельной скольжению, то система неограничена.

Индифферентные перемещения, в которых все точки смещаются, относятся к этому случаю. *В ограниченной системе индифферентные перемещения могут осуществляться путем простых поворотов.*

52. Если в некоторой системе имеется две параллельные оси, то существуют также параллельные оси, сколь угодно далекие, и система неограничена.

53. Если в некоторой системе имеется две оси, не расположенные в одной плоскости, то два последовательных индифферентных поворота вокруг обеих этих осей дадут такое перемещение, в котором ни одна точка не будет оставаться неподвижной, и система неограничена (п. 51).

54. Все оси системы не могут быть расположены в одной и той же плоскости.

55. *Ограниченная система обладает только одним главным центром повторяемости, через который проходят все ее оси.*

IV

Эта четвертая часть содержит доказательства некоторых положений, высказанных в третьей части: она разбита на рубрики под теми же номерами с добавлением приставки «бис».

8 *бис*. Теорема. *Если несколько осей повторяемости принадлежат к одной или к нескольким системам гомологичных осей, проходящих через*

одну и ту же точку, то произведение числа осей каждого рода на порядок соответствующих осей есть некоторое постоянное число, равное порядку центра повторяемости, который составляет эта точка.

Пусть, например, p — число гомологичных осей первого рода, q — порядок этих осей, p' и q', p'' и q'' — число и порядок осей другого рода; и пусть n — порядок центра повторяемости, которую составляет эта точка, тогда будем иметь

$$n = pq = p'q' = p''q'' = \ldots$$

Действительно, будем всегда рассматривать неподвижную систему и тождественную ей подвижную систему: выберем некоторую ось q-го порядка, проходящую через эту точку в подвижной системе, и пусть p есть число осей этого рода, проходящих через эту точку в этой системе. При различных последовательных совпадениях обеих рассматриваемых систем выбранная ось будет совмещаться с p гомологичными осями неподвижной системы, откуда следует p различных групп совпадений; в каждой из этих групп мы найдем q различных совпадений, которые мы получим, поворачивая подвижную систему вокруг выбранной оси; отсюда следует pq различных совпадений.

Кроме того, мы таким образом рассмотрим все случаи совпадения, так как для какого-нибудь одного из них выбранная перед этим ось в подвижной системе совместится с одной из p осей того же рода неподвижной системы, и в каждом из случаев такого рода мы будем рассматривать эти q возможных совпадений. Итак, если n есть порядок центра повторяемости, каковую составляет эта точка, то

$$n = pq.$$

Для осей другого рода будем иметь то же самое:

$$n = p'q',$$

$$n = p''q'',$$

$$\ldots,$$

что и требовалось доказать.

Примеры

Правильный тетраэдр. Через центр фигуры проходят: оси первого рода, четыре оси 3-го порядка, $4 \times 3 = 12$;

оси второго рода, четыре оси 3-го порядка (обратные предыдущим), $4 \times 3 = 12$;

оси третьего рода, шесть осей 2-го порядка (три двусторонние оси), $6 \times 2 = 12$.

Правильный тетраэдр обладает центром повторяемости 12-го порядка.

Геометрическая форма кристаллов кварца. Оси первого рода, две оси 3-го порядка (одна двусторонняя ось) $2\times3=6$;

оси второго рода, три оси 2-го порядка, $3\times2=6$;

оси третьего рода, три оси 2-го порядка (обратные предыдущим), $3\times2=6$.

Правильный пентагональный додекаэдр и правильный икосаэдр. Оси первого рода, 12 осей 5-го порядка (6 двусторонних осей), $12\times5=60$;

оси второго рода, пять осей 3-го порядка (10 двусторонних осей), $20\times3=60$;

оси третьего рода, 30 осей 2-го порядка (15 двусторонних осей), $30\times2=60$.

Прямой круговой цилиндр. Оси первого рода, две оси бесконечного порядка (одна двусторонняя ось), $2\times\infty=\infty$;

оси второго рода, бесконечное число осей 2-го порядка (двусторонние оси), $\infty\times2=\infty$.

9 *бис.* Одна ось q-го порядка должна быть осью q-го порядка для примыкающей к ней части, так как поворот на угол $\frac{2\pi}{q}$ вокруг этой оси есть индифферентное перемещение q примыкающих частей к p осям. Все они тождественны между собой, так как после индифферентного перемещения, совмещающего одну ось с некоторой другой, часть, примыкающая к первой оси, должна совместиться с примыкающей частью второй оси.

13 *бис.* Ни одна ось не может быть расположена внутри телесного угла некоторой составной части, так как тогда было бы n сходных осей, пересекающихся в главном центре n-го порядка. Соотношение $pq=n$ тогда давало бы $q=1$.

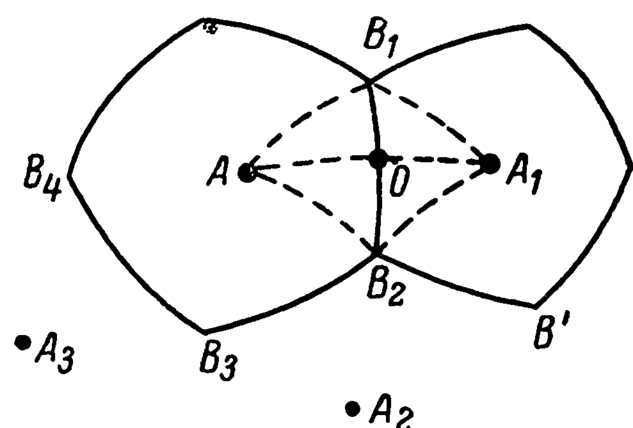
19 *бис.* Надо найти q различных индифферентных перемещений, приводящих некоторую ось q-го порядка к совпадению с некоторой другой осью q-го порядка того же рода; эти q индифферентных перемещений должны быть поворотами, производимыми вокруг осей, образующих равные углы с двумя первыми (см. п. 6), т. е. расположенными в их биссекторной плоскости.

21 *бис.* Два последовательных поворота, равные π, около двух двойных осей, образующих между собой угол, равный α, эквивалентны одному повороту на угол 2α около прямой, перпендикулярной двойным осям.

Всякий перпендикуляр к двойной оси есть двусторонняя прямая.

22 *бис.* Сфероэдрические системы с главными осями или с одним направлением осей суть единственные случаи кратных осей, которые могут встретиться. Действительно, система, обладающая двумя направлениями осей, всегда обладает двумя осями одного и того же рода (достаточно повернуть одну из осей вокруг другой, чтобы показать необходимость другой оси того же рода, что и первая).

Та система, которая обладает двумя осями одного и того же рода порядка выше 2-го, очевидно, входит в указанный случай. Система, которая обладает двумя осями 2-го порядка одного и того же рода, должна иметь по крайней мере два направления осей, лежащих в биссекторной плоскости двух первых (п. 19), из которых по крайней мере одна соответствует оси порядка выше 2-го. (Соответствующее ей индифферентное перемещение будет углом, меньшим, чем π). Поворачивая около одной из осей 2-го порядка, получим тогда две оси одного и того же рода порядка выше 2-го.



24 *бис*—27 *бис. Примыкающие многогранные углы в сфероэдрических системах.* Изобразим плоскости и оси, проходящие через главный центр O, их пересечениями со сферической поверхностью, имеющей центр в точке O.

Пусть OA и OA_1 будут две оси порядка q выше 2-го ($q > 2$), выбранные среди наиболее близких осей одного и того же рода. Мы предположим, кроме того, что эти оси не представляют собой двусторонних осей.

Пусть B_1B_2 есть биссекторная плоскость этих двух осей; повернем систему на $\frac{2\pi}{q}$ около оси OA последовательно q раз, тогда ось OA_1 последовательно примет положения OA_2, OA_3, . . ., OA_q, и там должны находиться оси того же рода; биссекторная плоскость образует грани правильного выпуклого многогранного угла, имеющего q граней, окружающих ось OA.

Мы можем привести ребро OB_1 в положение OB_2 двумя различными индифферентными перемещениями, а именно поворотом на угол $\frac{2\pi}{q}$ вокруг A (B_2 придет в B_3), либо поворотом на такой же угол вокруг A_1 (тогда B_2 придет в B').

Таким образом, ребра B суть оси повторяемости, так как два положения совпадения встречаются вокруг одной из них; чтобы перейти от одного из них к другому, достаточно повернуть на угол B_3B_2B'.

Заметим еще:

1°. *Что оси B не будут осями того же рода, что и оси A*, так как они расположены ближе к некоторым осям A, чем оси A_1 и A одна к другой, а эти последние были выбраны среди самых близких между собой осей этого рода.

Действительно, в трехграннике AA_1B_1 сумма двугранных углов A и A_1 либо равна, либо меньше 120° (значение 120° соответствует случаю, когда $q=3$); значение угла B этого треугольника всегда будет больше 60°, а грань трехгранника, противоположная углу B, будет, таким образом, больше грани, противоположной одному из углов A, откуда следует: $AA_1 > A_1B_2$.

2°. *Что не существует осей A, более близких к какой-либо оси B, которые не были бы осью, являющейся одним из ребер многогранного угла.*

Действительно, если бы существовала такая ось A', более близкая к B_2, которая была бы отлична от A, то существовало бы по крайней мере q' подобных осей вокруг B_2 (q' — порядок оси B); среди них мы нашли бы по крайней мере одну внутри угла $B'\,B_2\,B_3$ и эта ось того же рода, что и A, находилась бы ближе к A или A_1, чем B и, следовательно, ближе, чем A и A_1 друг от друга, что нелепо.

Мы уже раньше строили многогранник, грани которого суть биссекторные плоскости, ограничивающие телесный угол вокруг некоторой оси; этот телесный угол может быть больше, но он не может быть меньше части, примыкающей к этой оси, и должен содержать последнюю (п. 15); никакая другая биссекторная плоскость, относящаяся к рассматриваемой оси, не сможет ее разделять на части.

Вернемся к нашей фигуре на сферической поверхности. Если бы некоторая биссекторная плоскость P отделяла часть, содержащуюся в многограннике $B_1B_2B_3B_4$, эта плоскость соответствовала бы оси A и некоторой другой оси A' того же рода. Эта плоскость P отделяла бы угол A по крайней мере от одной из вершин многогранника, например от B_2; и тогда B_2 было бы ближе к одной оси того же рода, что и A, чем сама A (п. 14); мы видели, что это невозможно.

Таким образом, в сфероэдрических системах части, примыкающие к осям порядка выше 2-го, ограничены гранями правильного многогранного угла.

Построим многогранник, примыкающий к оси A_1, поворачивая B_1B_2 вокруг A_1; надо иметь возможность перевести первый многогранный угол во второй с помощью q различных индифферентных перемещений. Одна и та же грань B_2B_3, например первого многогранного угла, должна будет совпасть в этих q случаях с каждой гранью второго многогранного угла.

Чтобы совместить два телесных угла и привести B_2B_3 в B_2B_1, надо только повернуть первый телесный угол $B_1B_2B_3$ около B_2. Этот угол $B_1B_2B_3$ к тому же есть наименьший, который соответствует индифферентному движению вокруг B_2 (иначе было бы две оси того же рода, что и A, более близкие друг к другу, чем A_1 к A), итак, мы имеем $B_1B_2B_3 = \frac{2\pi}{q'}$, где q' — порядок оси B.

Чтобы совместить оба телесных угла и привести B_1B_2 в B_2B_1, надо только повернуть вокруг OC на угол, равный π.

Таким образом, OC — двойная ось.

Т е о р е м а. Мы, по существу, доказали, *что биссектриса угла между двумя наиболее близкими осями одного и того же рода выше 2-го порядка всегда есть двойная ось* [10].

28 *бис*. Всякий примыкающий многогранник можно разложить на q равносторонних составляющих трехгранника, таких, как OAB_1B_2.

Не может существовать других осей, кроме осей родов A, B и C, расположенных соответственно в центрах, вдоль ребер, вдоль середин граней примыкающих многогранников.

Другие оси, каков бы ни был их порядок и их положение, не позволили бы привести наиболее близкий составляющий трехгранник к совпадению с другим (см. п. 12).

32 *бис*. Двойные оси в сфероэдрических системах и все оси в системах двух последних групп суть двусторонние оси, ибо, если бы они были простыми, то обратные им составляли бы оси того же порядка, но иного рода, которых нет в этой системе.

Оси 3-го порядка первой группы — это единственные оси, которые разделяются на два рода осей одного и того же порядка с одинаковым числом осей каждого рода. Они действительно составляют четыре простые оси и обратные им, так как если бы они были двусторонними, то один род осей содержал бы две двусторонние оси и тогда невозможно было бы построить три ребра многогранного угла, примыкающих к оси другого рода.

34 *бис*. *Всегда можно приложить друг к другу правильные многогранные углы, равные углам* $\frac{2\pi}{q'}$, *пока они не заполнят полностью все пространство около вершины*, так как, если бы осталось пустое пространство, то оно, будучи ограниченным гранями многогранного угла, образующими между собой углы, по крайней мере равные его двугранным углам, всегда могло бы содержать многогранник. Кроме того, всегда можно прикладывать телесные углы, начиная с одной из осей, так, чтобы до конца сохранять их особенности. (Например, достаточно прикладывать друг к другу совокупность q телесных углов вокруг оси q-го порядка). Наконец, не существует двух способов прикладывания многогранников, так как каждое прикладывание грани уже образовавшегося контура производится только одним возможным способом.

43 *бис*. Если некоторая система обладает бесконечным числом осей, то она обладает осями, бесконечно близкими друг к другу.

Если некоторая система обладает двумя бесконечно близкими осями порядка выше 2-го, пересекающимися в одной точке, то всякая прямая, проходящая через эту точку, есть ось повторяемости того же рода. Действительно, если имеется две бесконечно близкие оси, то всегда будет две бесконечно близкие оси того же рода. Пусть дана некоторая более удаленная прямая, я утверждаю, что она также есть ось того же рода.

Путем индифферентного перемещения около одной из двух осей того же рода всегда можно получить подобную третью ось, более близкую к данной прямой, чем обе первые. Повторяя сходные построения около вновь полученных осей, мы приблизимся сколь угодно близко к заданной прямой; действительно, каждое приближение будет всегда больше, чем некоторая определенная доля расстояния между двумя первыми осями, вычисляемая приближенно в самом неблагоприятном случае. (Если эти оси будут

осями 2-го порядка, то эта доля будет равна нулю и все рассуждение уже более не применимо).

Если все прямые около некоторой точки — оси повторяемости, то эти оси суть оси изотропии, и мы имеем дело со сферическими системами.

Действительно, рассмотрим две оси OA и OA' q-го порядка, образующие между собой угол, близкий к π; в биссекторной плоскости этих двух осей должно найтись $2q$ осей повторяемости того же рода, которые должны приводить OA к OA' (п. 19) с помощью поворота на угол, определяемый формулой $K2\pi/q$, где K — целое число. В рассматриваемом же частном случае эти углы все должны быть очень близкими к π, т. е. различаться очень мало; таким образом, q должно быть исключительно большим, т. е. оси должны быть осями бесконечного порядка.

Примечание. *Может существовать бесконечное число осей конечного порядка выше 2-го, перпендикулярных некоторой плоскости. Это свойство* (как мы только что видели) *не распространяется на сферическую поверхность.*

44 *бис.* Если некоторая система обладает двумя бесконечно близкими осями 2-го порядка, пересекающимися в некоторой точке, то все прямые, расположенные в плоскости двух первых и проходящие через эту точку, суть оси 2-го порядка; линия, перпендикулярная этой плоскости, есть двусторонняя ось изотропии, и мы относим эту систему к VII классу.

Действительно, путем последовательных поворотов одну из осей совмещают с некоторым направлением в плоскости обеих осей; кроме того, некоторый поворот вокруг оси, перпендикулярной плоскости осей 2-го порядка, всегда эквивалентен двум последовательным поворотам на 180° вокруг обеих осей этой плоскости.



X

О СИММЕТРИИ [1]

I. Левые и правые прямоугольные координаты оси

1. *Существует два и только два различных вида прямоугольных координатных осей.* Положим, что наблюдатель прислонился к оси z и стоит на положительной стороне плоскости xy.

В одной системе координат, для того чтобы совместить ось x с осью y, надо повернуть ее на угол 90° в направлении, обратном движению стрелки часов, положенных у ног наблюдателя. Мы назовем такую систему *левой, или прямой, системой прямоугольных осей координат.*

В другой координатной системе ось x надо повернуть на 90° по направлению движения часовой стрелки, чтобы совместить ее с осью y. Такую систему мы назовем *правой, или обратной, системой прямоугольных осей координат.*

2. Мы будем отсчитывать углы в плоскости xy от 0 до 360°, начиная от оси Ox, в направлении, которое совмещает ее с осью Oy поворотом на 90°.

II. Две симметричные друг другу системы

3. Рассмотрим ограниченную или неограниченную систему точек, обладающих какими-либо свойствами. Примем, что можно полностью определить такую систему точек и те свойства, которыми они обладают, с помощью некоторых аналитических данных и трех прямоугольных осей.

Напишем, например, те аналитические данные, которые позволяют определить нашу систему, когда за оси координат взята левая система прямоугольных координатных осей в определенном положении. Если эти аналитические данные найдены, можно с их помощью построить новую систему, взяв на этот раз в качестве прямоугольных координатных осей три оси правой системы.

Системы точек, полученных с помощью одних и тех же аналитических данных, когда за координатные оси взята либо правая, либо левая системы, будут называться *симметричными друг другу*.

4. В двух симметричных системах точки попарно соответствуют друг другу; расстояния между соответствующими точками, а также все величины, к ним относящиеся, одинаковы, так как они могут быть вычислены с помощью одинаковых аналитических данных.

Все свойства, связанные с понятием направлений — «левое» или «правое», — вообще говоря, различны в обеих системах, хотя описываются одинаково, если определять эти направления при помощи точек системы. Так, угловой скорости ω вокруг прямой ab, позволяющей привести точку c в точку d в первой системе, будет соответствовать и во второй системе угловая скорость ω около прямой $a'b'$, приводящая c' в d' (где a', b', c', d' — точки, соответствующие точкам a, b, c, d). Или, говоря более общо, все свойства одной системы будут обнаруживаться в системе симметричной и могут быть описаны таким же точно образом, если все обозначения направлений указывать путем отнесения их к каждой системе (не пользуясь такими словами, как «правый», «левый», «прямое» направление, «обратное» направление).

5. Не существует более двух систем, которые обладали бы взаимными свойствами симметричных систем; это значит, что не существует более двух различных систем, образованных взаимно соответствующими точками, в которых все соответствующие величины и взаимные расположения были бы как раз такими, как мы изложили выше.

Действительно, если мы рассмотрим три прямоугольные координатные оси в какой-нибудь одной системе, то три соответствующие прямоугольные координатные оси найдутся в каждой другой из рассматриваемых соответствующих систем; те же самые аналитические данные будут служить для определения каждой системы с помощью осей координат. Но эти координаты не могут быть более чем двух видов; следовательно, системы также могут быть только двух разных типов.

Система, симметричная некоторой системе, которая в свою очередь симметрична другой системе, есть не что иное, как сама эта система.

6. Из всего сказанного следует, что для определения симметричных систем можно выбрать другую точку зрения и сказать, что *две системы, симметричные одна другой, суть две различные системы, образованные точками, которые попарно соответствуют друг другу и в которых соответствующие величины, свойства и относительные расположения частей одинаковы, если только определять все то, что имеет в каждой системе некоторое направление, с помощью ориентирующих реперов, взятых в самих системах (не пользуясь при этом словами: правый, левый, прямое направление, обратное направление).*

Таков наиболее общий способ определения тех соотношений, которые существуют между двумя системами, симметричными друг другу [2].

III. Симметрические преобразования

7. Мы называем *симметрическими преобразованиями* все виды преобразований, которые, будучи применены к какой-либо системе, дают систему, симметричную ей.

8. Теорема. *Два симметрических преобразования, примененные последовательно к какой-нибудь системе, производят то же действие, что и некоторое простое перемещение системы в пространстве* [3].

Это непосредственно следует из того, что система, симметричная симметричной системе, тождественна самой системе.

Мы выразим эту теорему проще, сказав, что *дважды примененное симметрическое преобразование тождественно некоторому перемещению*. Таким образом, дважды примененное симметрическое преобразование в самом общем случае эквивалентно винтовому движению; в частных случаях оно может дать трансляцию, вращение или может даже просто восстановить первоначальную систему точка в точку.

9. Теорема. *Если некоторая система определена аналитически и отнесена, например, к левым осям координат, то некоторое симметрическое преобразование сводится к такому построению системы, для которого надо воспользоваться теми же аналитическими данными и подходящим образом выбранными правыми прямоугольными осями координат.*

Повторение одного и того же симметрического преобразования сводится к такому построению системы, для которого надо воспользоваться теми же аналитическими данными, но взять такие левые оси, которые расположены относительно первоначальных преобразованных правых осей так же, как эти последние расположены относительно первоначальных левых осей.

Первая часть этой теоремы очевидна.

Система, подвергаемая первому симметрическому преобразованию, может быть также определена аналитически с помощью первоначальных левых осей; для этого надо только установить, каковы необходимые новые аналитические данные.

Второе симметрическое преобразование будет состоять (поскольку оно тождественно первому) в построении новой системы с этими новыми аналитическими данными и правыми осями; после этого правые оси преобразуются в левые оси, которые будут определяться аналитически таким же образом относительно правых осей, как эти последние определялись относительно первоначальных левых осей. Последние левые оси будут, впрочем, окончательным результатом двойного преобразования первых левых осей, и первые аналитические данные, которые служили для определения первоначальной системы относительно первых левых осей, будут служить для определения дважды преобразованной системы, отнесенной к последним левым осям.

IV. Симметрия системы

10. Может случиться, что некоторая система определяется аналитически одинаково, если пользоваться левыми прямоугольными координатными осями, имеющими определенное положение, либо правыми прямоугольными осями, расположенными в этой системе несколько иначе.

Такое свойство характеризует систему, тождественную своей симметричной системе.

Мы говорим, что такая система является *симметричной* системой.

Некоторой точке системы, определенной аналитически относительно левых осей, соответствует некоторая другая точка системы, определенная таким же образом относительно правых осей; эта последняя точка будет точкой, симметричной первой в этой системе.

Некоторая точка будет симметричной точкой системы, если она будет определена аналитически одинаково как относительно левых, так и относительно правых осей.

11. Если в некоторой симметричной системе изменять левые оси координат, система останется симметричной, но только новым левым осям будут соответствовать новые правые оси. Для того чтобы формулы преобразования аналитических данных были теми же самыми, эти новые правые оси должны относиться к первоначальным правым осям так же, как новые левые оси относятся к первоначальным левым осям. После такого изменения осей координат каждая точка всегда будет иметь в качестве симметричной ту же точку, что и прежде, так как координаты того же наименования некоторой точки и точки, симметричной ей, будучи подвергнуты тем же преобразованиям, остаются равными друг другу.

12. *Индифферентное симметрическое преобразование* — это такое преобразование, которое оставляет систему в состоянии, тождественном тому, в котором она находилась до преобразования. Индифферентные симметрические преобразования могут встречаться только в симметричных системах, и симметричные системы необходимо должны обладать индифферентными симметрическими преобразованиями.

Теорема. *Два индифферентных симметрических преобразования некоторой симметричной системы, примененные к ней последовательно, дают индифферентное перемещение системы.*

Действительно, два симметрических преобразования эквивалентны некоторому перемещению (см. п. 8). Так как каждое преобразование оставляет систему в состоянии, тождественном тому, в котором она находилась прежде, то то же самое будет иметь место и в случае результирующего перемещения, которое будет поэтому индифферентным.

В более общем случае два индифферентных симметрических преобразования эквивалентны поэтому некоторому индифферентному движению, происходящему вокруг некоторой винтовой оси повторяемости системы;

в некоторых частных случаях два индифферентных симметрических преобразования могут быть эквивалентны повороту на угол $k\frac{2\pi}{q}$ (k — целое число) около оси повторяемости q-го порядка, либо могут быть эквивалентны простой трансляции или даже могут точка в точку восстановить первоначальную систему.

V. Элементы симметрии системы

13. Т е о р е м а. *Симметричная система всегда имеет:*

либо плоскость простой симметрии с полюсом q-го порядка;

либо плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка;

либо центр симметрии;

либо плоскость простой поступательной симметрии;

либо плоскость перемежающейся поступательной симметрии (q — произвольное целое число) [4].

Симметричная система может, впрочем, обладать сочетанием нескольких из этих элементов симметрии.

Можно также сказать, что *в самом общем случае некоторого индифферентного симметрического преобразования точки, симметричные точкам системы, можно получить, опуская из каждой точки перпендикуляр на некоторую определенную плоскость и продолжая этот перпендикуляр по другую сторону этой плоскости на длину этого перпендикуляра; всю систему полученных таким путем точек поворачивают на угол $k\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{q}$ вокруг оси повторяемости q-го порядка, перпендикулярной указанной плоскости.*

Пять элементов симметрии, указанные выше, суть единственно возможные элементы симметрии, соответствующие разным случаям симметрических преобразований одного и того же рода.

14. Рассмотрим сначала частный случай индифферентного симметрического преобразования, в котором некоторая точка o симметрична самой себе.

Координаты точки того же самого наименования одинаковы как по отношению к левым осям, так и по отношению к соответствующим симметричным правым осям. Изменим левые координатные оси и выберем новые левые оси с началом в точке o, новые соответствующие симметричные правые оси будут также иметь свое начало в o.

Повторим два раза индифферентное симметрическое преобразование, характеризуемое соответствием правых осей левым; точка o остается неподвижной, получающееся индифферентное движение (п. 12) будет в самом общем случае поворотом на угол $k\frac{2\pi}{q}$ вокруг некоторой оси повторяемости A q-го порядка, проходящей через точку o. Переменим еще раз

левые оси координат, сохраняя опять начало в точке o, но беря в качестве оси z ось повторяемости A. Правые координатные оси, соответствующие этим новым левым осям, будут все еще иметь свое начало в точке o.

Будем теперь поворачивать правую систему вокруг своей оси z (соответствующая левая система также поворачивается вокруг своей оси z) пока ось ox' правой системы не окажется расположенной в плоскости xy левой системы и не будет составлять с ox угол, меньший, чем 180°.

Эти две последние системы осей координат, таким образом полученные, суть те, которые мы приняли с самого начала; мы имеем (рис. 1) левую систему осей координат ($oxyz$), у которой осью z служит ось повторяемости A, и имеем соответствующую правую систему ($ox'y'z'$) осей координат, ось x которой (ox') расположена в плоскости xy левой системы. Пусть φ — угол между обеими осями x, а Θ — между обеими осями z; φ меньше 180°.

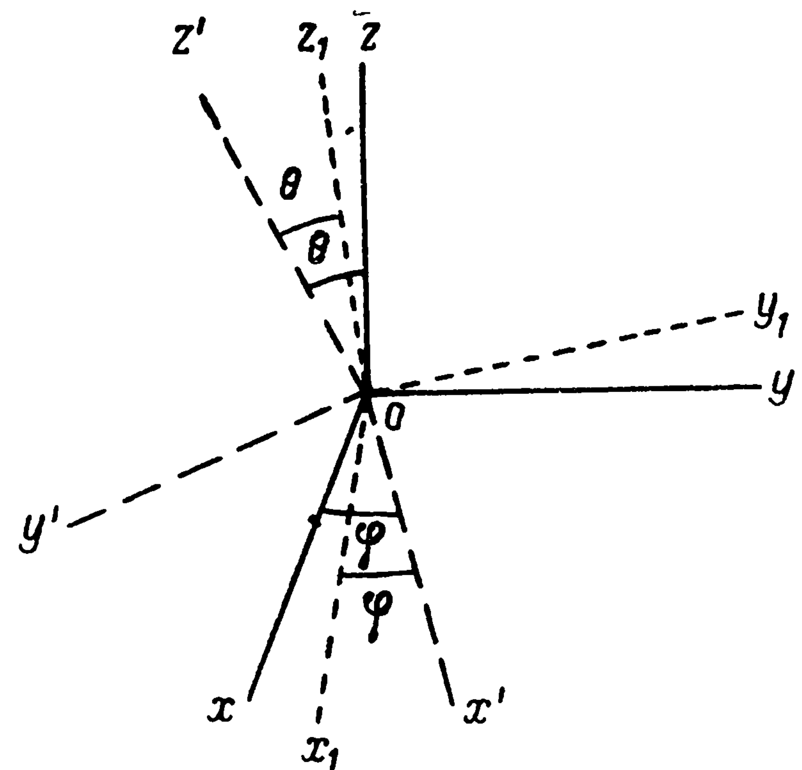


Рис. 1.

Вернемся теперь к двойному индифферентному симметрическому преобразованию; это двойное преобразование совершенно не будет изменяться при изменении осей координат (п. 11) и всегда будет эквивалентно некоторому повороту вокруг оси повторяемости A, которая есть не что иное, как ось oz.

После первого преобразования ($oxyz$) станет ($ox'y'z'$), а после второго преобразования — ($ox_1y_1z_1$).

Вот как можно построить эти последние оси координат: ($ox_1y_1z_1$) должны быть по отношению к ($ox'y'z'$) тем же, что ($ox'y'z'$) представляет собой по отношению к ($oxyz$) (п. 9); ox' находится в плоскости oxy и образует с ox угол φ (φ отсчитывается в том же направлении, которое ведет от ox к oy); ox_1, следовательно, будет в плоскости $ox'y'$ и будет составлять угол φ с ox' (φ будет отсчитываться в направлении, которое ведет от ox' к oy').

Мы получим oz' с помощью oz, заставив эту прямую повернуться на угол Θ около ox' в направлении, которое уменьшает, например, угол между oz и ox. Следовательно, мы получим oz_1, заставив oz' повернуться вокруг ox_1 на угол Θ в направлении, которое уменьшает угол между oz' и ox'.

Но ($ox_1y_1z_1$) должно быть некоторым преобразованием осей ($oxyz$), получаемым путем простого поворота вокруг oz; следовательно, oz_1 должно совпадать с oz и плоскость ox_1y_1 должна совпадать с oxy. Это может иметь место только в следующих трех случаях:

1°. $\theta=0$ и φ произвольно, oz' совпадает с oz, а $(ox_1y_1z_1)$ совпадает с $(oxyz)$;

2°. $\theta=\pi$ и φ произвольно, oz' противоположно oz;

3°. θ произвольно и $\varphi=0$, ox' совпадает с ox, а $(ox_1y_1z_1)$ совпадает с $(oxyz)$.

1° и 3°. Правые координатные оси и соответствующие левые имеют одну общую ось того же наименования, например, ось oz; оси ox и ox' образуют между собой некоторый угол φ.

Поворачивая левые оси координат вокруг oz на угол $\frac{\varphi}{2}$, мы получим новую систему левых осей. Соответствующие правые оси получаются путем поворота на $\frac{\varphi}{2}$ в обратном направлении, так что новые правые и левые оси будут иметь общие оси двух родов (здесь это будут оси x и z), а оси третьего рода будут противоположны друг другу (здесь это будут оси y).

Говорят, что система обладает *плоскостью симметрии* (здесь это zx') и каждая точка системы имеет симметричную точку, которая получается путем замены y на $-y$, т. е. опусканием перпендикуляра на эту плоскость симметрии и продолжением его на длину, равную его длине.

Система совмещается со своим изображением, взятым относительно этой плоскости.

Заметим, что в этом случае не обязательно должны быть оси повторяемости и что точка, симметричная симметричной точке, есть не что иное, как сама первоначальная точка.

2°. Оси z левой системы осей и соответствующей ей симметричной системы противоположны друг другу. Пусть φ есть угол между ox и ox'; ox_1 образует с ox угол, равный 2π, и мы будем иметь

$$2\varphi = k\frac{2\pi}{q},$$

где k — некоторое целое число, а q — порядок оси повторяемости ox.

Индифферентное симметрическое преобразование состоит в повороте системы на угол φ вокруг одной из осей повторяемости q-го порядка и затем в образовании ее изображения в перпендикулярной плоскости. Так как ось повторяемости есть ось q-го порядка, то будет существовать $(q-1)$ других возможных симметрических преобразований; эти q преобразований получаются путем поворота системы на угол $\left(k\frac{2\pi}{q}+\varphi\right)$ около оси повторяемости, где k равно 0, 1, 2, . ., $(q-1)$, и последующего образования ее изображения в плоскости, перпендикулярной этой оси. Мы будем говорить, что мы имеем дело с *плоскостью симметрии с полюсом q-го порядка* и что такая плоскость указывает на существование q различных индифферентных симметрических преобразований.

Имеем

$$2\varphi = k\frac{2\pi}{q};$$

здесь возможны два случая: либо k есть четное, либо нечетное число.

Первый случай. k — четное число:

$$k = 2k', \quad \varphi = k'\frac{2\pi}{q}.$$

Угол поворота в этих q симметрических преобразованиях будет равен $k\frac{2\pi}{q}$, где k равно 0, 1, 2, ..., $(q-1)$. В этом случае говорят, что имеется *плоскость простой симметрии с полюсом q-го порядка.*

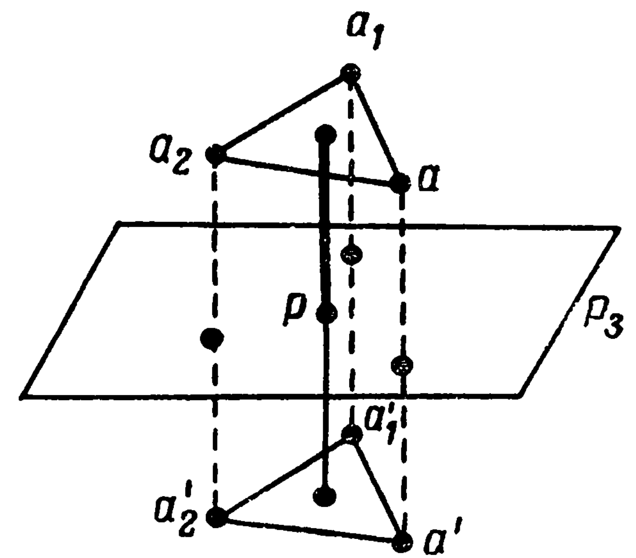


Рис. 2.

Индифферентное симметрическое преобразование (когда $k=0$) состоит в образовании изображения системы относительно плоскости без добавления к этому преобразованию какого-нибудь поворота.

Всякую обычную плоскость симметрии, соединенную с перпендикулярной осью повторяемости q-го порядка, надо рассматривать как простую плоскость симметрии с полюсом q-го порядка.

Каждой точке соответствует $(q-1)$ других точек, гомологичных первой в результате повторяемости; эти q гомологичных точек расположены в некоторой плоскости, нормальной к оси повторяемости, в вершинах правильного многоугольника с q сторонами; ось проходит через центр фигуры этого многоугольника. Первой из рассматриваемых точек соответствует еще q симметричных точек, которые представляют собой не что иное, как изображения в плоскости простой симметрии q точек, гомологичных в результате повторяемости. На рис. 2 представлены точки, гомологичные точке a в результате повторяемости и симметрии в случае, когда имеется плоскость простой симметрии с полюсом 3-го порядка P_3.

Если q — четное число, то один из поворотов среди индифферентных симметрических преобразований будет равен π (когда мы будем иметь $k=\frac{q}{2}$), но мы видим, что система левых осей и соответствующая ей правая система, симметричная относительно этого индифферентного симметрического преобразования, будут тогда точно противоположны, ось в ось. Если это имеет место, мы говорим, что система обладает *центром симметрии.* Каждой точке системы соответствует симметричная точка, которая получается, если соединить эту точку с центром прямой и на продолжении ее за центр отложить равное расстояние. Точка, симметричная симметрич-

ной точке по отношению к центру, есть не что иное, как сама исходная точка.

Следовательно, одно из q индифферентных симметрических преобразований плоскости простой симметрии с полюсом q-го порядка представляет собой преобразование с центром симметрии, когда q есть четное число, причем этот центр симметрии совпадает с полюсом плоскости.

Когда q — нечетное число, полюс плоскости простой симметрии не может быть центром симметрии.

Второй случай. k — нечетное число:

$$k = 2k' + 1, \quad \varphi = \left(k' + \frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q}.$$

Угол поворота в этих q симметрических преобразованиях будет равен $\left(k + \frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q}$, где k равно 0, 1, 2, ..., $(q-1)$.

В этом случае говорят, что имеет место *плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка.*

Плоскость перемежающейся симметрии не обладает больше свойствами плоскостей симметрии в обычном значении этого слова, т. е. система не совмещается со своим изображением относительно этой плоскости.

Некоторой точке соответствует $(q-1)$ других точек, гомологичных первой, и в силу повторяемости эти q гомологических точек расположены в плоскости, перпендикулярной оси повторяемости, и совпадают с вершинами правильного многоугольника с q сторонами, а эта ось проходит через центр фигуры этого многоугольника. Первой точке соответствует еще q симметричных точек; эти последние могут быть получены, если для q точек, гомологичных благодаря повторяемости, взять их изображения относительно плоскости перемещающейся симметрии и повернуть эти изображения на угол $\frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{q}$ около оси повторяемости. Мы видим, что эти симметричные точки в своих положениях вокруг оси *перемежаются* с положениями тех точек, которые получились, если бы мы имели дело с плоскостью простой симметрии с полюсом того же порядка; это оправдывает то название, которое мы приняли.

Рис. 3 изображает точки, гомологичные точке a в силу повторяемости и в силу симметрии в случае плоскости перемежающейся симметрии с полюсом 3-го порядка (II_3).

В противоположность тому, что наступает тогда, когда имеется плоскость простой симметрии, полюс плоскости перемежающейся симметрии не может быть центром симметрии, если его порядок q — четное число, и, наоборот, он обязательно будет центром симметрии, если q — нечетное число. В этом последнем случае одно из q симметрических преобразований плоскости представляет собой также преобразование относительно центра симметрии.

Плоскость перемежающейся симметрии с полюсом 1-го порядка допускает единственное индифферентное симметрическое преобразование. которое заключается в повороте системы на угол π вокруг нормали к плоскости, проходящей через этот полюс, и затем в образовании изображения относительно плоскости. Это симметрическое преобразование эквивалентно преобразованию с центром симметрии, когда этот центр совмещен с полюсом плоскости.

Таким образом, когда говорят, что некоторая система имеет плоскость перемежающейся симметрии с полюсом 1-го порядка, или когда говорят, что она обладает центром симметрии, то это — эквивалентные утверждения.

15. Кратко говоря, когда в некоторой симметричной системе некоторая точка O сама себе симметрична, то мы всегда имеем либо *плоскость простой симметрии с полюсом q-го порядка*, *либо плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка*, проходящие через эту точку; сама эта точка будет тогда полюсом этих плоскостей.

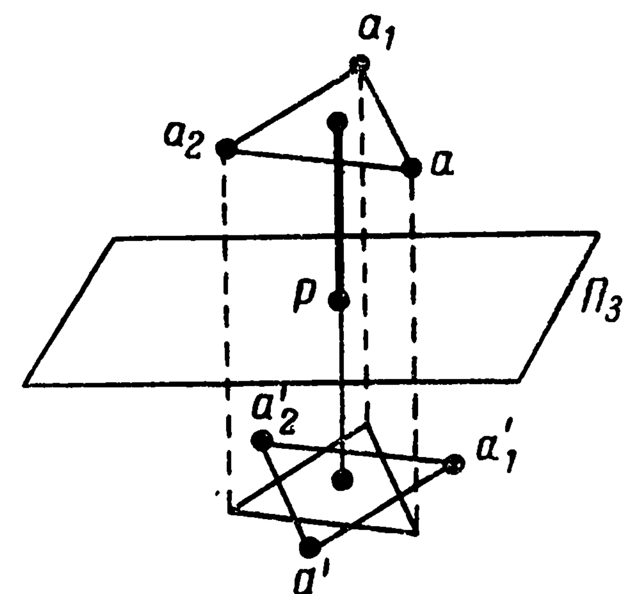


Рис. 3.

Когда q — четное число, то существование плоскости простой симметрии q-го порядка влечет за собой существование центра симметрии в полюсе O (свойства центра, впрочем, полностью содержатся в свойствах плоскости с полюсом q-го порядка).

Когда q — нечетное число, то существование плоскости перемежающейся симметрии порядка q влечет за собой существование центра симметрии в полюсе O (свойства центра содержатся полностью в свойствах плоскости перемежающейся симметрии).

Наоборот, существование плоскости простой симметрии с полюсом q-го порядка, где q — нечетное число, или существование плоскости перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка, где q — четное число, несовместимы с существованием центра симметрии в полюсе O.

Плоскость простой симметрии 1-го порядка есть плоскость симметрии в обычном значении слова (все точки плоскости суть полюсы 1-го порядка).

Сказать, что некоторая система обладает плоскостью перемежающейся симметрии с полюсом 1-го порядка, это все равно, что сказать, что система обладает центром симметрии в полюсе плоскости.

В системе, обладающей центром симметрии, всякая плоскость, проходящая через этот центр, может рассматриваться как плоскость перемежающейся симметрии с полюсом 1-го порядка. Перпендикулярно плоскости простой симметрии с полюсом q-го порядка или перпендикулярно плоскости перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка всегда существует ось повторяемости q-го порядка, проходящая через этот полюс плоскости.

16. Рассмотрим теперь более общий случай, когда система определяется аналитически одинаково по отношению к левой и по отношению к правой прямоугольным осям координат, имеющим разные начала.

Повторим дважды двойное симметрическое преобразование, определяющее соответствие правых осей левым осям. Получающееся индифферентное перемещение (п. 12) в наиболее общем случае будет винтовым движением вокруг винтовой оси повторяемости A системы.

Изменим теперь левые оси координат; перенесем начало на винтовую ось A и ориентируем эти оси координат так, чтобы ось z совпадала с этой винтовой осью и чтобы, кроме того, ось ox' новой правой симметричной системы была параллельна плоскости xy левой системы и составляла бы с ox угол, меньший π. Этот последний результат всегда можно получить, поворачивая обе системы координатных осей вокруг их осей z.

Пусть $(oxyz)$ и $(ox'y'z')$ будут этими новыми левой и правой системами координатных осей.

Повторим двойное симметрическое преобразование с этими новыми осями: $(oxyz)$ после первого преобразования станет $(o'x'y'z')$ и после второго — $(o_1x_1y_1z_1)$. Поскольку это двойное преобразование эквивалентно некоторому винтовому движению вокруг oz, то o_1 получается на oz, а o_1z_1 совпадает с прямой oz и имеет то же направление, что и oz (хотя o и o_1, вообще говоря, различны).

Займемся прежде всего ориентацией. Проведем через произвольную точку O прямоугольные координатные оси $OXYZ$, $OX'Y'Z'$ и $OX_1Y_1Z_1$, соответственно параллельные осям $oxyz$, $o'x'y'z'$ и $o_1x_1y_1z_1$.

Пусть φ — угол между осями OX и OX', который равен также углу между ox и $o'x'$; и пусть Θ — угол между осями OZ и OZ', который равен также углу между oz и $o'z'$; оси $OX_1Y_1Z_1$ должны быть по отношению к $OX'Y'Z'$ тем же, чем $OX'Y'Z'$ являются по отношению к $OXYZ$ (п. 9); OX находится в плоскости $X'OY'$, а OZ_1 должно совпадать с OZ.

Мы уже видели, что это может произойти только в следующих трех случаях:

1°. $\Theta=0$ при φ произвольном, $o'z'$ параллельно oz и имеет то же направление; $(o_1x_1y_1z_1)$ параллельно $(oxyz)$ для каждой из осей;

2°. $\Theta=\pi$ при произвольном φ, $o'z'$ параллельно oz, но направлено в противоположную сторону;

3°. Θ произвольно при $\varphi=0$, $o'x'$ параллельно ox и имеет то же направление; $o_1x_1y_1z_1$ параллельно $oxyz$.

1° и 3°. Левые и правые оси координат имеют каждая по одной из осей, параллельных между собой и обладающих одним и тем же направлением, например оси oz.

Первое изменение осей. Повернем левые оси вокруг oz (соответствующие правые оси поворачиваются вокруг $o'z'$), пока оси ox и $o'x'$ не станут параллельными и направленными в одну и ту же сторону, а оси oy и $o'y'$ не станут тогда параллельными, но противоположно направленными.

Второе изменение осей. Сообщим левым осям трансляцию, параллельную oy (соответствующие правые оси переносятся при этом параллельно в обратном направлении), пока плоскости xz и $x'z'$ не совместятся.

Третье изменение осей. Повернем левые оси вокруг oy (соответствующие правые оси поворачиваются при этом вокруг $o'y'$), пока обе оси x не окажутся на одной и той же прямой, проходящей через оба начала.

Итак, окончательно имеем: плоскость xz — общая для правых и левых осей, оси x имеют одно направление и совмещены с одной и той же прямой, расстояние между началами на этой прямой пусть будет, например, τ, оси y параллельны, но имеют противоположные направления, оси z параллельны и имеют одинаковое направление. Мы скажем в этом случае, что система имеет *плоскость трансляционной симметрии* (рис. 4).

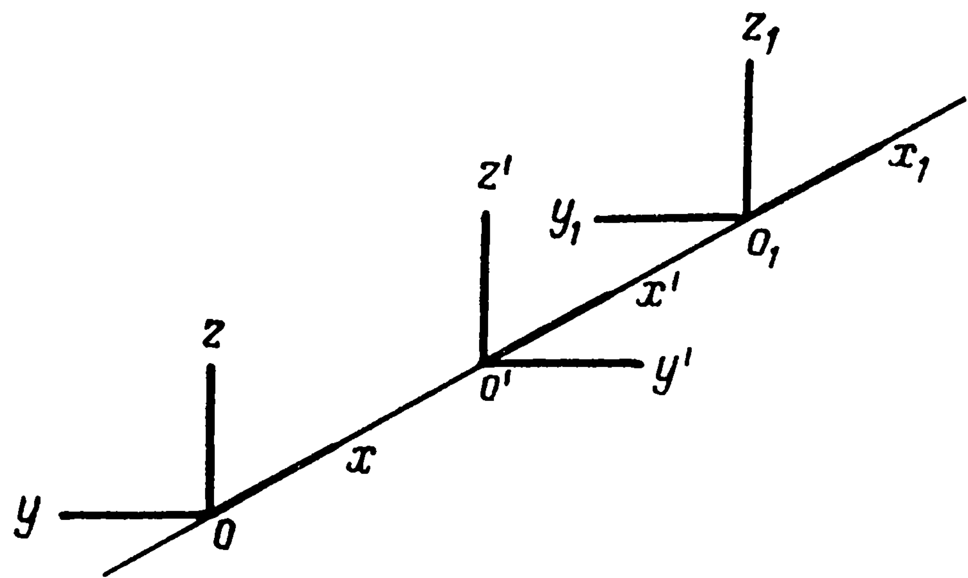


Рис. 4.

Точку, симметричную некоторой точке по отношению к такой плоскости, мы получим, если возьмем сперва точку, симметричную в обычном смысле по отношению к этой плоскости, и сообщим ей затем определенное перемещение τ, параллельное плоскости в некотором определенном направлении. Для того чтобы плоскость трансляционной симметрии была вполне определена, необходимо знать, помимо самой этой плоскости, величину и направление этой трансляции τ.

Если дважды повторить индифферентное симметрическое преобразование, характеризуемое плоскостью трансляционной симметрии, то мы получим трансляцию повторяемости в том же направлении, что и трансляция этой плоскости симметрии, но на величину 2τ. Такая трансляция повторяемости влечет за собой, как мы знаем, бесконечное множество других трансляций повторяемости, равных $k2\tau$ (где k — некоторое целое число). Каждая трансляция повторяемости $k2\tau$ связана с некоторым индифферентным симметрическим преобразованием трансляции τ, порождающим новое индифферентное симметрическое преобразование, аналогичное первому, но с трансляцией $(2k+1)\tau$; итак мы получаем бесконечное число индифферентных симметрических преобразований.

Если τ есть наименьшая из трансляций этих индифферентных симметрических преобразований, то, как мы видели, будет существовать трансляция повторяемости, равная 2τ; при этом могут представляться два случая: либо эта трансляция повторяемости 2τ будет наименьшей среди этих трансляций, параллельных рассматриваемому направлению, либо трансляция повторяемости, наименьшая среди этих трансляций, параллельных

рассматриваемому направлению, будет равна τ. Никакой другой случай не допустим, так как всякая трансляция, равная некоторой доли τ, повлекла бы за собой существование трансляционного симметрического преобразования с трансляцией, меньшей τ, что противоречит предположению.

Если наименьшая трансляция повторяемости равна τ, то имеется *плоскость простой трансляционной симметрии*, и такая плоскость есть не что иное, как некоторая плоскость симметрии в обычном смысле этого слова, сопровождаемая некоторой трансляцией повторяемости τ, параллельной этой плоскости. Всякой точке соответствует бесконечно много гомологичных точек, получающихся благодаря повторяемости и расположенных на одной и той же прямой, параллельной этой плоскости и следующих одна за другой через одинаковые интервалы, равные τ. Этой точке соответствует также бесконечно много симметричных точек, которые представляют собой изображения по отношению к этой плоскости указанных гомологичных по повторяемости точек.

Если наименьшая трансляция повторяемости равна 2τ, то имеется *плоскость перемежающейся трансляционной симметрии*. Всякой точке соответствует бесконечное число других точек, гомологичных по повторяемости, расположенных на одной и той же линии, параллельной плоскости, и следующих друг за другом через промежутки, равные 2τ. Этой точке соответствует также бесконечное число симметричных точек, которые можно получить, если взять изображения в плоскости точек, гомологичных по повторяемости, и сместить их на величину τ вдоль той прямой, на которой они находятся. Мы видим, что эти симметричные точки *чередуются* по положению на той же самой прямой с теми, которые находились бы на ней, если бы дело шло о плоскости простой трансляционной симметрии.

Плоскость простой трансляционной симметрии можно рассматривать как плоскость простой симметрии с полюсом бесконечного порядка, расположенным на бесконечности в направлении, перпендикулярном этой трансляции.

Оси z правой системы и соответствующей ей симметричной системы параллельны, но противоположны.

Изменим координатные оси: сообщим левым осям трансляцию, параллельную z, до тех пор (соответствующие правые оси переносятся при этом параллельно в противоположном направлении), пока плоскости xy не совпадут. Затем повернем левые оси вокруг oz, пока oy не пройдет через o' (правые оси при этом поворачиваются около $o'z'$).

Точка o_1 должна быть по отношению к $(o'x'y'z')$ тем, что o' представляет собой по отношению к $(oxyz)$, следовательно, она должна быть расположена на $o'y'$, но кроме того, она должна быть расположена на винтовой оси A или oz; следовательно, во-первых, o_1 не может быть не чем иным, как точкой o.

Возможны только два случая: либо расстояние oo' равно нулю и мы снова возвращаемся к уже рассмотренному случаю системы симметричной

в некоторой точке; либо $o'y'$ и oy имеют противоположные направления и совпадают с прямой, соединяющей оба начала. В этом случае можно сообщить левым осям некоторую трансляцию, такую, что (правая система при этом будет перемещаться в противоположном направлении) оба начала совпадут; мы тогда опять имеем уже рассмотренный случай. Оси одинакового наименования правой и левой систем находятся на продолжении одна другой и направлены в противоположные стороны: мы имеем центр симметрии.

17. Итак, помимо простых плоскостей симметрии с полюсом q-го порядка, плоскостей перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка и центров симметрии, система может еще иметь *плоскости простой или перемежающейся трансляционной симметрии*. Эти последние могут соответствовать только какой-нибудь бесконечной среде.

Симметричная система, не имеющая никаких симметричных точек (т. е. никаких точек, которые были бы подлинно симметричны), может обладать только плоскостями перемежающейся трансляционной симметрии.

Мы имеем *плоскость непрерывной трансляционной симметрии*, если трансляция τ бесконечно мала.

VI. Теоремы

18. Если система имеет центр симметрии, то все плоскости, проходящие через этот центр и перпендикулярные некоторой оси повторяемости четного порядка ($q=2k$), проходящей через этот центр, суть плоскости прямой симметрии с полюсом q-го порядка; все плоскости, проходящие через этот центр и перпендикулярные некоторой оси нечетного порядка ($q=2k+1$), проходящей через этот центр, суть плоскости перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка.

19. Когда система обладает плоскостью симметрии, проходящей через центр симметрии, то прямая, перпендикулярная плоскости, проходящей через центр, есть ось повторяемости четного порядка (Бравэ).

20. Когда плоскость симметрии проходит через ось повторяемости q-го порядка, то всегда существует q плоскостей симметрии, проходящих через эту ось (Бравэ).

Две такие следующие друг за другом плоскости образуют между собой угол, равный $\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{q}$; если q — четное число, то эти плоскости будут сдвоенными (по повторяемости) и будут плоскостями двух разных родов по отношению к повторяемостям, определяемым этой осью; если же q нечетно, то эти плоскости не будут двусторонними, по отношению к оси они все будут одного и того же рода, но обратные им плоскости могут рассматриваться как плоскости второго рода по отношению к этой оси.

21. Если две плоскости симметрии пересекаются, их линия пересечения есть ось повторяемости (Бравэ).

22. Известно, что двусторонняя поворотная ось q-го порядка имеет следствием существование $2q$ осей (q осей 2-го порядка или четного порядка и обратных им), лежащих в плоскости, перпендикулярной первой оси. Эти $2q$ осей все пересекаются у основания главной оси на этой плоскости.

Теорема. *Если некоторая плоскость простой симметрии с полюсом q-го порядка содержит оси 2-го (или четного) порядка, проходящие через этот полюс (их будет $2q$), то эта система будет обладать q плоскостями симметрии, проходящими через ось нормальной повторяемости q-го порядка и через эти оси 2-го порядка.*

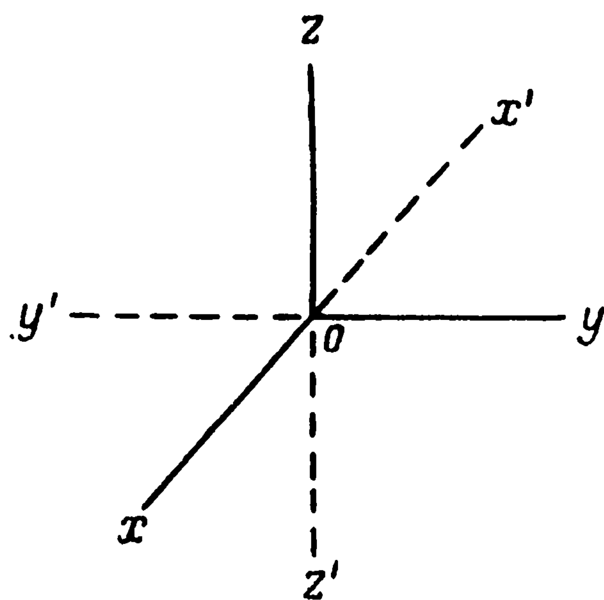


Рис. 5.

Действительно, выберем левые оси координат ($Oxyz$) (рис. 5), полагая ось z осью повторяемости q-го порядка и ось y одной из осей 2-го порядка. Пусть Ox', Oy', Oz' противоположны Ox, Oy, Oz, поскольку xOy есть плоскость симметрии, то $Oxyz'$ есть правая система осей, симметричная ($Oxyz$) в этой системе; поскольку Oy есть одна из осей повторяемости четного порядка, то $Ox'zy$ будет гомологично по повторяемости ($Oxyz'$) и, следовательно, симметрично ($Oxyz$). Таким образом, плоскость zOy есть плоскость симметрии.

Обратно: если некоторая плоскость симметрии проходит через ось q-го порядка и перпендикулярную ось четного порядка, то плоскость, перпендикулярная оси q-го порядка и проходящая через ось четного порядка, есть плоскость простой симметрии с полюсом q-го порядка. Доказательство аналогично предыдущему.

23. Теорема. *Если некоторая плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка содержит оси второго (или четного) порядка, проходящие через этот полюс, то система будет обладать q плоскостями симметрии, проходящими через главную ось q-го порядка и по биссектрисам между двумя смежными осями 2-го порядка.*

Действительно, выберем левые прямоугольные координатные оси ($Oxyz$), имеющие ось z осью повторяемости q-го порядка (рис. 6) и ось y одной из осей второго порядка Oy.

Пусть:
Oz' противоположно Oz; Oy — ось 2-го порядка, самая близкая к Oy $\left(y'Oy=\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{q}\right)$; Oy_1 — биссектриса угла yOy'.

Плоскость xOy есть плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка, правые оси координат ($Ox'y'z'$) суть симметричные оси, соответствующие осям ($Oxyz$); поскольку Oy есть ось 2-го порядка ($Ox''y'z$)

суть оси, гомологичные по повторяемости осям $(Ox'y'z')$ и, следовательно, симметричные соответственно осям $(Oxyz)$.

Изменение осей $(Oxyz)$, переводящее Oy в Oy_1 путем поворота вокруг Oz, обусловливает соответствующее изменение симметричных осей $(Ox''y'z)$, переводящее также Oy' в Oy в результате поворота вокруг Oz.

Эти новые оси симметрии показывают, что zOy_1 есть плоскость симметрии.

Обратно: если через некоторую двустороннюю ось q-го порядка и по биссектрисе между двумя смежными осями четного порядка, перпендикулярными первой оси, проходит некоторая плоскость симметрии, то плоскость, перпендикулярная главной оси, есть плоскость перемежающейся симметрии с полюсом порядка q. Доказательство аналогично предыдущему.

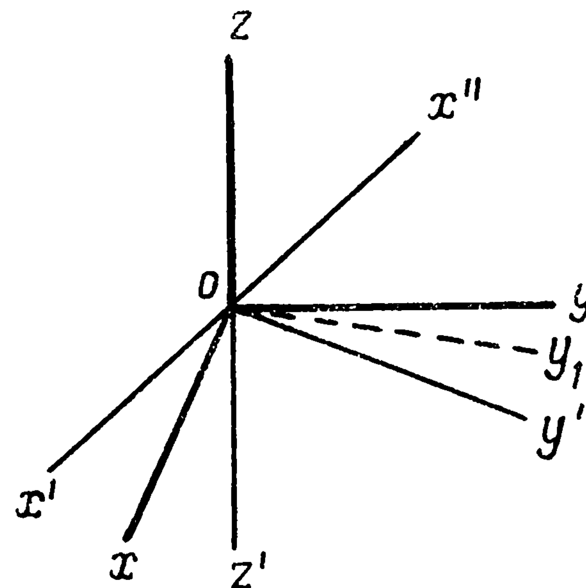


Рис. 6.

24. Наконец, если некоторая система обладает осью q-го порядка, перпендикулярной плоскости симметрии или плоскости перемежающейся симметрии, через которую проходит q плоскостей симметрии, то она будет также обладать $2q$ осями 2-го порядка, лежащими в плоскости симметрии или в плоскости перемежающейся симметрии, и эта ось q-го порядка будет двусторонней.

25. Подводя итоги, рассмотрим следующие три группы элементов упорядоченности:

1°. Плоскость симметрии или плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка.

2°. q осей четного порядка, лежащих в этой плоскости и проходящих через полюс.

3°. q плоскостей симметрии, проходящих через ось q-го порядка, перпендикулярную плоскости.

Эти три группы элементов упорядоченности могут существовать каждая отдельно вместе с осью q-го порядка; они могут существовать вместе, но две какие-либо из этих групп не могут быть соединены в одной системе без того, чтобы третья также в нее не входила.

26. То же самое для следующих трех элементов упорядоченности:

1°. Плоскость симметрии.

2°. Центр симметрии в этой плоскости.

3°. Ось повторяемости четного порядка, перпендикулярная этой плоскости и проходящая через этот центр.

1°, 2° и 3° могут существовать раздельно, но две из них вместе неизбежно вызывают наличие третьей.

27. То же самое и для следующих элементов упорядоченности:

1°. Плоскость перемежающейся симметрии.

2°. Центр симметрии с полюсом в этой плоскости.

3°. Ось повторяемости нечетного порядка, перпендикулярная этой плоскости и проходящая через этот полюс.

VII

Чтобы определить все те симметрические преобразования, которые может допустить система, надо указать на все плоскости симметрии, все плоскости перемежающейся симметрии, все плоскости трансляционной симметрии и все центры симметрии системы.

Для того чтобы система определенных повторяемостей представляла собой некоторый возможный тип симметричной системы, надо, чтобы, после того как были распознаны элементы симметрии ее, мы получили связную систему, т. е. такую систему, в которой можно произвести все индифферентные симметрические преобразования и все указанные индифферентные перемещения, без того чтобы возникла необходимость наличия новых элементов симметрии или повторяемости.

Можно также доказать существование некоторого типа, приведя пример существующей системы и такой системы, которую нельзя отнести к каким-нибудь другим типам, существование которых есть основание предполагать.

VIII. Симметрия в разных типах повторяемости, относящихся к ограниченной системе [1]

Плоскости трансляционной симметрии никогда не могут составлять части таких систем; они могут существовать только в неограниченных системах и таких, в которых некоторой произвольной точке всегда соответствует бесконечно много других гомологичных точек.

Все плоскости простой или перемежающейся симметрии имеют полюсом центр главной повторяемости, причем этот центр главной повторяемости может быть только единственным. На тех же основаниях все центры симметрии совпадают с этим центром главной повторяемости. Этот центр главной повторяемости симметричен стало быть по отношению ко всем элементам симметрии, и потому мы можем назвать эту главу: *Повторяемость и симметрия относительно точки.*

Те типы повторяемости, которые мы предлагаем рассмотреть, находятся:

I. В сфере.
II. В правильном икосаэдре.
III. В кубе.
IV. В тетраэдре.
V. В прямой призме с основанием в виде правильного многоугольника с q сторонами.

[1] Другими словами, симметрия в типах повторяемости, обладающих одним центром главной повторяемости, через который проходят все оси.

VI. В правильной пирамиде, имеющей основанием правильный многоугольник с q сторонами.

VII. В прямом круговом цилиндре.

VIII. В прямом круговом конусе.

IX. В любом геометрическом теле без повторяемости.

Эти девять типов повторяемостей могут, во-первых, не содержать какой-либо симметрии.

Мы будем обозначать через L^q ось повторяемости q-го порядка.

Мы будем на каждой прямой рассматривать некоторое направление и будем считать различными совпадающие прямые противоположного направления; отсюда следует, что число осей будет удвоено по сравнению с обычно принимаемым. Если противоположно направленные оси суть оси одного и того же рода в отношении повторяемости, то они составляют двустороннюю ось. Если же оси противоположного направления суть оси разного рода в смысле повторяемости, то их обозначают по-разному: например, (L^q, l^q) суть противоположно направленные оси q-го порядка разного рода.[2]

Мы будем обозначать через P^q плоскость симметрии с полюсом q-го порядка и через Π^q — плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка; мы будем вообще вводить обозначения P и Π в символы системы под обозначениями осей повторяемости, которые им перпендикулярны.

Будем обозначать через C центр симметрии.

Мы не будем здесь делать предположения о наличии направления (положительной стороны) у плоскостей симметрии, такое рассмотрение приводило бы к известным упрощениям в символах некоторых систем; оно бы удваивало число плоскостей симметрии в каждой системе [5].

I. *Сферический тип*

1°. Тип, лишенный симметрии

$$\infty L^\infty.$$

Пример. Сфера, наполненная жидкостью, обладающей способностью вращать плоскость поляризации.

2°. Симметричный тип. Бесконечное число плоскостей симметрии с полюсом ∞-го порядка, центр симметрии; например, сферическая поверхность

$$\left.\begin{matrix}\infty L^\infty \\ \infty P^\infty\end{matrix}\right\} C.$$

II. *Тип икосаэдра* $12L^5,\ 20L'^3,\ 30L''^2$.

1°. Никакой симметрии

$$12L^5,\ 20L'^3,\ 30L''^2.$$

[2] См.: P. Curie. Sur les questions d'ordre. Bull. de la Soc. minéral., 89, 1884. [Наст. изд., стр. 49].

2°. Шесть плоскостей перемежающейся симметрии, перпендикулярных осям 5-го порядка, откуда следует центр симметрии, и 10 плоскостей перемежающейся симметрии, перпендикулярных осям 3-го порядка.

15 плоскостей симметрии, перпендикулярных осям 2-го порядка, проходящих через оси 5-го, 3-го и 2-го порядков

$$\left.\begin{matrix} 12L^5, & 20L'^3, & 30L''^2 \\ 6\Pi^5, & 10\Pi'^3, & 15P''^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Рассматривая многогранник, примыкающий к какой-либо оси 5-го порядка, легко видеть, что плоскости симметрии проходят через эту ось и могут быть только плоскостями одного рода (иначе говоря, результатом существования этих плоскостей будут новые оси). Эти плоскости порождают случай 2°.

Две плоскости перемежающейся симметрии, перпендикулярные двусторонним осям 2-го порядка, будут проходить через оси 2-го порядка и, следовательно, будут обусловливать существование плоскостей симметрии. Этот случай 2° есть, таким образом, единственный симметричный тип.

Тип куба $6L^4,\ 8L'^3,\ 12L''^2$

1°. Никакой симметрии.

Пример. Гемиэдрическая разновидность гексоктаэдра

$$6L^4,\ 8L'^3,\ 12L''^2.$$

2°. Три плоскости симметрии с полюсом 4-го порядка, перпендикулярные осям 4-го порядка.

Откуда следует центр симметрии.

Откуда следуют шесть плоскостей симметрии с полюсом 2-го порядка, перпендикулярные осям 2-го порядка.

Откуда следуют еще четыре плоскости перемежающейся симметрии с полюсом 3-го порядка, перпендикулярные осям 3-го порядка.

Пример. Куб

$$\left.\begin{matrix} 6L^4, & 8L'^3, & 12L''^2 \\ 3P^4, & 4\Pi'^3, & 6P''^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Никакие другие случаи невозможны.

Рассматривая многогранник, прилегающий к оси 4-го порядка, можно убедиться, что единственно возможные плоскости симметрии будут те, которые указаны в п. 2° и которые необходимо приводят к этому типу.

Плоскость перемежающейся симметрии, перпендикулярная оси 4-го или 2-го порядка, будет проходить через оси 2-го порядка (поскольку эти оси двусторонние и обусловливают существование плоскостей симметрии) (п. 24).

IV. *Тип тетраэдра* $4L^3,\ 4l^3,\ 6L'^2$

1°. Никакой симметрии

$$4L^3,\ 4l^3,\ 6L'^2.$$

Примеры. Хлорноватокислый натрий. Тетартоэдрическая разновидность гексоктаэдра, выводимая из куба.

2°. Плоскости, перпендикулярные бинарным осям, суть плоскости симметрии с полюсом порядка 2, откуда следует центр симметрии и четыре плоскости перемежающейся симметрии с полюсом 3-го порядка, перпендикулярные осям 3-го порядка

$$\left.\begin{matrix} \underbrace{4L^3,\ 4l^3}_{4\Pi^3} & 6L'^2 \\ & 3P'^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Пример. Пентагональный додекаэдр, выводимый из куба, гемиэдрическая разновидность пирамидального куба $\frac{1}{2}b_n^m$.

3°. Три плоскости, перпендикулярные осям 2-го порядка, суть плоскости перемежающейся симметрии с полюсом 2-го порядка, откуда следуют шесть плоскостей симметрии, проходящих через оси 3-го и 2-го порядка (отсутствует центр симметрии и нет никаких элементов, перпендикулярных осям 3-го порядка). Правильный тетраэдр

$$\begin{matrix} 4L^3,\ 4l^3,\ 6L'^2 \\ 3\Pi'^2,\ 6P''. \end{matrix}$$

V. *Тип с двусторонней главной осью q-го порядка* $2L^q,\ qL'^2,\ qL''^2$

1°. Никакой симметрии

$$2L^q,\ qL'^2,\ qL''^2.$$

2°. Плоскость, перпендикулярная главной оси и проходящая через оси 2-го порядка, есть плоскость симметрии с полюсом q-го порядка. q плоскостей симметрии, проходящих через главную ось и оси 2-го порядка.

Пример. Правильная прямая призма с q гранями.

Если q — четное число, то имеется центр симметрии:

$$\left.\begin{matrix} 2L^q, & qL'^2, & qL''^2 \\ P^q, & \frac{q}{2}P'^2, & \frac{q}{2}P''^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Если q — нечетное число, то центра симметрии нет:

$$\begin{matrix} 2L^q, & \underbrace{qL'^2,\ ql'^2} \\ P^q & qP'^2. \end{matrix}$$

3°. Имеется плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка, перпендикулярная главной оси и проходящая через оси 2-го порядка.

Имеется q плоскостей симметрии, проходящих через главную ось и биссектрисы между двумя последовательными осями 2-го порядка.

Пример. Правильная прямая призма с $2q$ гранями, представляющими собой $2q$ фасеток e^n[6], из них q у верхних концов половины ребер и q у нижних концов другой половины, причем ребра каждой половины перемежаются.

Если q — четное число, то центр симметрии отсутствует:

$$\begin{matrix} 2L^q, & qL'^2,\ qL''^2, \\ \Pi^q, & \frac{q}{2}P''',\ \frac{q}{2}P^{\mathrm{IV}}. \end{matrix}$$

Если есть нечетное число, то имеется центр симметрии:

$$\left.\begin{matrix} 2L^q, & \underbrace{qL'^2,\ ql'^2} \\ \Pi^q & qP'^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Это все возможные случаи; частный случай, когда $q=2$, по-видимому, может дать случай с тремя прямоугольными плоскостями перемежающейся симметрии, однако плоскости симметрии такого типа показывают, что тогда в системе по необходимости существует ось 3-го порядка и мы вновь приходим к тетраэдрическому типу.

VI. *Тип с одной осью q-го порядка и противоположной ей L^q, l^q*

1°. Отсутствие симметрии

$$L^q,\ l^q.$$

2°. Имеется плоскость симметрии с полюсом q-го порядка, перпендикулярная оси

$$\underbrace{L^q,\ l^q}_{P^q}.$$

Пример. Апатит. Правильная прямая призма с q вертикальными гранями, измененная на каждом вертикальном ребре вертикальными гранями,

не касающимися первых граней и наклоненных одинаково у всех ребер $\left(\text{грани } \frac{1}{2} h^n\right)$.

Когда q — четное число, то имеется центр симметрии.

Когда q нечетно, центр симметрии отсутствует.

3°. Имеется плоскость перемежающейся симметрии с полюсом q-го порядка, перпендикулярная оси

$$\underbrace{L^q,\ l^q}_{\Pi^q}.$$

Пример. Правильная призма с q гранями, углы e у верхних концов половины ребер несут только небольшие грани (b^m, b^n, h^p); углы e у нижних концов других ребер также несут небольшие грани e; все эти небольшие грани наклонены одинаково и ребра каждой половины чередуются при обходе вокруг призмы.

Когда q четно, центр симметрии отсутствует (случай, пропущенный Бравэ).

Когда q нечетно, имеется центр симметрии.

4°. Имеется q плоскостей симметрии, проходящих через ось.

Примеры. Правильная пирамида с q боковыми гранями. Турмалин. Нет ни центра симметрии, ни перпендикулярной плоскости симметрии:

$$\begin{array}{l} L^q,\ l^q, \\ \quad\ qP. \end{array}$$

VII. *Двусторонняя ось изотропии* $2L^\infty,\ \infty L'^2$

1°. Отсутствие симметрии

$$2L^\infty,\ \infty L'^2.$$

Примеры. Прямой круглый цилиндр, наполненный жидкостью, обладающей вращательной способностью.

Система двух одинаковых цилиндров, оси изотропии которых расположены на продолжении друг друга, вращающихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью вокруг их общей оси.

2°. Плоскость, перпендикулярная главной оси, есть плоскость симметрии.

Отсюда следует центр симметрии и бесконечное число плоскостей симметрии, проходящих через главную ось

$$\left.\begin{array}{ll} 2L^\infty, & \infty L'^2 \\ P^\infty, & \infty P'^2 \end{array}\right\} C.$$

Пример. Прямой круглый цилиндр.

Повторяемости и симметрия конечных систем (24 типа)

Типы сферические	∞L^{∞}	$\left.\begin{matrix}\infty L^{\infty}\\ \infty P^{\infty}\end{matrix}\right\} C$	—	—
Типы икосаэдрические	$12L^5, 20L^3, 30L^2$	$\left.\begin{matrix}12L^5, & 20A^3, & 30L^2\\ 6\Pi^5, & 10\Pi^3, & 6P^2\end{matrix}\right\} C$	—	—
Типы кубические	$6L^4, 8L^3, 12L^2$	$\left.\begin{matrix}6L^4, & 8L^3, & 12L^2\\ 3P^4, & 4\Pi^3, & 6P^2\end{matrix}\right\} C$	—	—
Типы тетраэдрические	$4L^3, 4l^3, 6L^2$	$\left.\begin{matrix}\underbrace{4L^3, 4l^3}, 6L^2\\ 4\Pi^3 \quad 3P'^2\end{matrix}\right\} C$	$4L^3, 4l^3, 6L^2$ $3\Pi^2, 6P''$	—
Типы с двусторонней главной осью	$2L^q, qL'^2, qL''^2$	q четное $\left\{\begin{matrix}2L^q, qL'^2, qL''^2\\ P^q, \frac{q}{2}P'^2, \frac{q}{2}P''^2\end{matrix}\right\} C$	$\left\{\begin{matrix}2L^q, qL'^2, qL''^2\\ \Pi^q. \quad \frac{q}{2}P''' \frac{q}{2}P^{IV}\end{matrix}\right.$	—
		q нечетное $\left\{\begin{matrix}2L^q, qL'^2, qL''^2\\ P^q, \quad qP''\end{matrix}\right.$	$\left.\begin{matrix}2L^q, \underbrace{qL'^2, ql'^2}\\ \Pi^q, \quad qP^2\end{matrix}\right\} C$	—
Типы, обладающие некоторой осью и противоположной ей	L^q, l^q	$\underbrace{L^q, l^q}_{P^q}$ (C если q четно)	$\underbrace{L^q, l^q}_{\Pi^q}$ (C если q нечетное)	L^q, l^q
Типы с двусторонней осью изотропии	$2L^{\infty}, \infty L^2$	$\left.\begin{matrix}2L^{\infty}, \infty L^2\\ P^{\infty}, \infty P^2\end{matrix}\right\} C$	—	—
Типы, обладающие осью изотропии и противоположной ей	L^{∞}, l^{∞}	$\left.\underbrace{L^{\infty}, l^{\infty}}_{P^{\infty}}\right\} C$	—	$L^{\infty}, \overset{qP}{l^{\infty}}, \infty P$
Типы без повторяемостей	O	P	C	—

VIII. *Одна ось изотропии и противоположная ей L^∞, l^∞*

1°. Отсутствие симметрии

$$L^\infty,\ l^\infty.$$

Пример. Круглый прямой конус, вращающийся с некоторой скоростью вокруг своей оси.

2°. Имеется плоскость симметрии, перпендикулярная оси изотропии, и центр симметрии

$$\left.\underbrace{L^\infty,\ l^\infty}_{P^\infty}\right\} C.$$

Примеры. Магнитное поле. Прямой круглый цилиндр, вращающийся с некоторой скоростью вокруг своей оси изотропии.

3°. Имеется бесконечное число плоскостей симметрии, проходящих через ось изотропии.

Отсутствие центра симметрии

$$\begin{matrix} L^\infty,\ l^\infty, & \\ & \infty P. \end{matrix}$$

Примеры. Электрическое поле. Прямой круглый конус.

IX. *Никакой повторяемости*

1°. Отсутствие симметрии. Любая неупорядоченная система.

2°. Имеется плоскость симметрии.

Пример. Совокупность каких-либо неупорядоченных систем и совокупность, симметричная ей относительно некоторой плоскости.

3°. Имеется центр симметрии.

Примеры. Произвольный параллелепипед. Совокупность произвольных неупорядоченных систем и совокупность, симметричная ей относительно некоторого центра.

Замечание I. Геометрическая система точек не может обладать осью изотропии без того, чтобы одновременно не иметь плоскостей симметрии, проходящих через эту ось; для того чтобы эти плоскости симметрии исчезли, надо чтобы эти точки были наделены какими-нибудь направленными свойствами (т. е. чтобы с ними были связаны представления о направлении и сторонности).

Отсюда следует, что три типа

$$\infty L^\infty,\ 2L^\infty,\ \infty L'^2,\ L^\infty,\ l^\infty$$

без симметрии и тип

$$\underbrace{L^\infty,\ l^\infty}_{P}$$

с плоскостью симметрии, перпендикулярной оси изотропии, не могут быть построены с помощью системы геометрических точек.

Замечание II. *Система, обладающая главным центром повторяемости n-го порядка, либо не будет симметричной в этой точке, либо же будет обладать n и только n различными симметрическими преобразованиями.*

Действительно, предположим, что дана симметричная система, отнесенная к левым прямоугольным координатным осям; те же самые аналитические данные будут служить для определения системы с помощью правой системы координатных осей. Но этим правым осям соответствует $(n-1)$ других правых систем координатных осей, гомологичных по повторяемости, которые позволят построить данную систему с помощью тех же аналитических данных; таким образом, возможны $(n-1)$ других симметрических преобразований. Всего возможно n и только n различных симметрических преобразований, ибо, если бы было больше, чем n, различных систем правых координатных осей, позволяющих определить систему с помощью тех же аналитических данных, то также было бы больше, чем n. различных повторяемостей, что и требовалось доказать.

Вышесказанное легко проверить на полученных нами типах симметрии; надо только заботиться, чтобы не сосчитать несколько раз симметрическое преобразование, обусловленное центром, которое может оказаться частью симметрических преобразований от всех плоскостей симметрии с полюсом четного порядка, или от всех плоскостей перемежающейся симметрии с полюсом нечетного порядка. Впрочем, легко доказать, что два симметрических преобразования, определенных различным образом элементами симметрии, могут быть тождественными только в том случае, если они оба эквивалентны одному преобразованию, обусловленному центром симметрии.

Рассмотрим, например, тип кубической симметрии

$$\left.\begin{matrix} 6L^4, & 8L^3, & 12L^2 \\ 3P^4, & 4\Pi^3, & 6P^2 \end{matrix}\right\} C.$$

Центр дает одно симметрическое преобразование; плоскость P дает три симметрических преобразования, не учитывающих то, которое уже обусловлено центром; отсюда следует, что три плоскости дают 9 симметрических преобразований.

Точно так же Π^3 дает два новых симметрических преобразования, откуда для четырех плоскостей перемежающейся симметрии получается 8 преобразований. Аналогично P^2 дает одно новое преобразование, откуда для шести плоскостей P^2 получается шесть преобразований.

$$1+9+8+6=24;$$

и 24 как раз и есть порядок центра повторяемости. Из порядка и числа осей мы имеем

$$4 \times 6 = 8 \times 3 = 12 \times 2 = 24.$$

Замечание III. Рассмотрим какую-нибудь прямую, проходящую через центр главной повторяемости; этой прямой, вообще говоря, соответствует $(n-1)$ других прямых, гомологичных по повторяемости, и n, гомологичных по симметрии; *всего $2n$ прямых, играющих в этой системе сходные роли.*

Если эти прямые, гомологичные по повторяемости, совпадают с симметричными им прямыми, они тогда находятся в плоскостях симметрии; мы имеем не более чем n сходных прямых.

Если эти прямые, гомологичные по повторяемости, суть оси q-го порядка, то их будет $\frac{n}{q}$ и будет $\frac{2n}{q}$ сходных прямых, если присоединить еще симметричные им.

Если прямые, гомологичные по повторяемости, суть оси q-го порядка и они совмещаются с симметричными им прямыми, то будем иметь не более чем $\frac{n}{q}$ сходных прямых.

Каждому роду прямых соответствует род перпендикулярных им плоскостей; можно, однако, легко подсчитать грани многогранников, отличных от всех сходных между собой граней, которые могут войти в один из типов повторяемости и симметрии. *Наиболее сложный из этих многогранников будет иметь $2n$ граней в симметричном типе с центром повторяемости n-го порядка.*

Заключение

Мы показали, что для изучения симметрии какой-нибудь системы надо не только рассматривать плоскости симметрии, но также плоскости перемежающейся симметрии и плоскости перемежающейся трансляционной симметрии, имеющие такое же значение.

Ограниченная симметричная система обладает определенным числом индифферентных симметрических преобразований; это все те преобразования, которые необходимо указать, чтобы определить симметрию системы. Каждому элементу симметрии (плоскости прямой или перемежающейся симметрии) соответствует некоторая часть этих преобразований.

Плоскости трансляционной симметрии могут встречаться только в неограниченных средах; пока еще не изучена симметрия таких сред (следовательно, пока еще не изучена достаточно полно симметрия кристаллического вещества, которое надо рассматривать как неограниченное, если хотят знать его внутреннее строение) [7]. Бравэ, напротив, изучал повторяемости и симметрию многогранников, но он рассматривал только центры и плоскости симметрии и не рассматривал плоскости перемежающейся

симметрии. Помимо отсутствия гармонии, к которому должно было привести это упущение, Бравэ забыл об одном типе симметрии, в котором нет ни центра симметрии, ни плоскости симметрии, но в котором имеется плоскость перемежающейся симметрии. Это тип симметрии

$$\underbrace{L^q,\ l^q}_{\Pi^q}$$

с четным q.

Для ограниченных систем мы различили 9 типов повторяемости, которые подразделяются на 24 типа, если учесть различные виды симметрии.

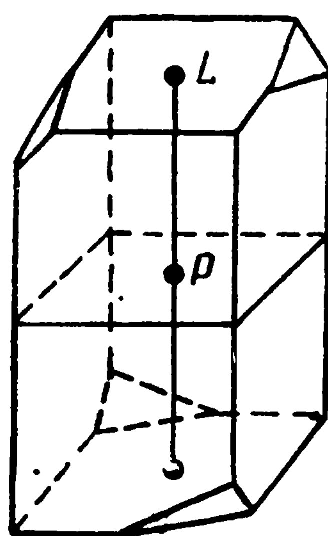


Рис. 7.

Если стать на кристаллографическую точку зрения, когда не могут существовать оси 5-го порядка и оси порядка выше 6-го, то *внешние формы* могут быть включены только в 15 из этих типов.

Если q равно 2, 3, 4 или 6, то есть основание учитывать различие между двусторонними главными осями q-го порядка и простыми; таким путем мы приходим к 36 различным видам внешней формы кристаллов. Однако рассмотрение внутреннего строения кристаллических тел, которое мы не можем здесь излагать, показало бы нам, что в таких телах могут существовать только плоскости перемежающейся симметрии с полюсом 2-го или 3-го порядков; 4 из предыдущих видов оказываются поэтому также невозможными, и число возможных видов внешней формы кристаллов окончательно сводится к 32 видам, образующим 11 групп, если соединить вместе виды, имеющие те же повторяемости. Среди этих 32 видов имеется только один, обладающий плоскостью перемежающейся симметрии, не сопровождаемой центром или плоскостью симметрии; это вид

$$\underbrace{L^2,\ l^2}_{\Pi^2}.$$

(Здесь L^2 и l^2 изображают одиночную ось и противоположную ей; Π^2 — плоскость перемежающейся симметрии, перпендикулярная этой оси).

Относящиеся сюда кристаллы могут быть представлены в виде квадратной призмы, обладающей четырьмя небольшими тетартоэдрическими гранями, происходящими от сильно скошенной модификации (рис. 7). Эти четыре грани, будучи продолжены, дали бы квадратный тетраэдр, который, если бы только он имел место, входил в состав вида

$$2L^2,\ 2L'^2,\ 2L''^2,$$
$$\Pi^2,\ P''',\ P^{\mathrm{IV}}.$$

Согласно теории, никогда не встречаются кристаллы, обладающие плоскостями перемежающейся симметрии с полюсами, отличными от полюсов 2-го и 3-го порядков (куб, ромбоэдр, тетраэдр, и т. д.). Я не утверждаю, что никогда не встретятся кристаллы вида

$$\underbrace{L^2,\ l^2}_{\Pi^2},$$

которые могут, однако, существовать; было бы интересно иметь пример, так как кристаллы этого рода были бы единственными, форма которых, будучи симметричной, не имела бы ни центра, ни плоскости симметрии.

Примечание

В начале этой статьи было сделано допущение, что всегда можно определить некоторую систему с помощью аналитических данных, отнесенных к трем прямоугольным осям. По-видимому, невозможно доказать это положение в общем виде. Однако необходимо проверить его в каждом частном случае.

Пока дело идет о системе геометрических точек, никаких трудностей нет. Когда эти точки наделены какими-либо свойствами, не содержащими никаких представлений о направлении и сторонности, такими, как температура, плотность, давление в случае жидкости, эти качества рассматриваются как функции координат, и при симметрическом преобразовании всякая преобразованная точка будет обладать тем же самым качеством с той же интенсивностью, которую она имела до преобразования.

Если же точка наделена каким-нибудь направленным свойством, т. е. с ней входит в рассмотрение представление о каком-то направлении, ее обычно изображают некоторой геометрической фигурой вблизи этой точки, могущей определять это качество и по величине и по направлению с помощью какого-нибудь особого условия; однако точки такой фигуры не будут совпадать с точками системы. Чтобы определить аналитически такие свойства в какой-либо точке, устанавливают прямоугольные оси, параллельные осям системы и имеющие начало в рассматриваемой точке. Те аналитические данные, которые нужны для определения фигуры, изображающей это свойство, будут тогда функциями координат точки системы. Часто бывает очень трудно найти такую фигуру, которая бы надлежащим образом изображала это свойство.

Такое свойство характеризуется теми действиями, которые оно производит, или теми причинами, которые его вызвали. Для того чтобы фигура правильно изображала свойство в некоторой точке, нужно, чтобы она обнаруживала те же элементы повторяемости и симметрии, что и вся совокупность действий, производимых этим свойством, или лучше сказать, что

и совокупность причин, вызвавших возникновение этого свойства в рассматриваемой точке. Точка, наделенная каким-нибудь определенным свойством, входит, таким образом, в какой-либо определенный тип повторяемости и симметрии.

Скорость, сила, сила электрического поля могут быть представлены прямой, имеющей некоторую длину, определенное направление и начало в рассматриваемой точке; эти величины обладают осью изотропии, через которую проходит бесконечное число плоскостей симметрии.

Наоборот, в отношении симметрии совершают грубую ошибку, когда силу магнитного поля изображают прямой, имеющей определенную длину и направление. Действительно, сила магнитного поля в некоторой точке может быть произведена круговым электрическим током с центром в рассматриваемой точке. Возьмем ток, симметричный этому, относительно содержащей его плоскости, тогда ничего не изменится и магнитное поле останется тем же; между тем, если изображать это поле стрелкой, то при симметрическом преобразовании оно изменит свое направление.

Чтобы подходящим образом представить силу магнитного поля в некоторой точке, надо нарисовать окружность, перпендикулярную направлению поля с центром в рассматриваемой точке и предположить, что каждая точка этой окружности наделена некоторым особым свойством, которое может быть представлено маленькой стрелкой, касательной к окружности.

Магнитное поле обладает осью изотропии с перпендикулярной плоскостью симметрии и центром симметрии.

Другие свойства будет еще труднее изобразить каким-либо подходящим способом; так, например, обстоит дело с интенсивностью оптической вращательной способности.

Замечание. Исходной точкой для определения симметрии магнитного поля служит знание симметрии электрического поля. Можно заметить, что если бы были известны только электромагнитные явления и явления индукции, то было бы вполне законно приписать магнитному полю симметрию электрического поля; только тогда было бы необходимо приписать электрическому полю ту симметрию, которую мы дали магнитному полю. Указанные явления дают только связь между симметрией обоих этих свойств. Для того чтобы сделать выбор между этими двумя гипотезами, надо рассмотреть еще и другие явления, такие, как образование электричества химическим путем, электрические явления в турмалине и магнитное вращение плоскости поляризации.



XI

О СИММЕТРИИ В ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ: СИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ [1]

I. Я думаю, что было бы интересно ввести в изучение физических явлений также и рассмотрение свойств симметрии, столь знакомое кристаллографам.

Изотропное тело, например, может быть приведено в прямолинейное движение или во вращательное; жидкость может стать местом, в котором происходят вихревые движения; твердое тело может быть сжато или скручено; оно может оказаться в электрическом или магнитном поле; через него может проходить электрический ток или поток тепла; оно может пропускать через себя луч света либо естественный, либо прямолинейно, по кругу, или по эллипсу поляризованный, и т. д. Во всех этих случаях в каждой точке тела обязательно имеет место определенная характеристичная диссимметрия. Эта диссимметрия становится еще более сложной, если предположить, что в одной и той же среде одновременно происходит несколько этих явлений, или если эти явления происходят в кристаллической среде, которая уже в силу своего строения обладает определенной диссимметрией.

Физики часто используют условия, обусловленные симметрией, но обычно пренебрегают определением симметрии в том или ином явлении, так как достаточно часто эти условия симметрии просты и почти очевидны a priori.[1]

Хотелось бы, чтобы при обучении физике эти вопросы излагались более явно: например, при изучении электричества целесообразно формулировать почти с самого начала характерную симметрию электрического и магнитного полей; после чего можно было бы пользоваться этими понятиями, что значительно облегчило бы многие доказательства.

[1] Кристаллографы, которые вынуждены рассматривать наиболее сложные случаи, создали общую теорию симметрии. В курсах физической кристаллографии (которые одновременно представляют собой подлинные курсы физики) вопросы симметрии представлены с наибольшей обстоятельностью. См. курсы Маллара, Либиша и Соре [2].

С некоторых общих точек зрения понятие симметрии, может быть, несколько напоминает понятие о размерности; эти два основных понятия характерны соответственно, с одной стороны, для той среды, в которой происходит явление, и, с другой стороны, для той величины, которая служит для определения интенсивности последнего.

Две среды, обладающие одинаковой диссимметрией, связаны между собой особым образом, и отсюда можно вывести некоторые физические следствия. Связь подобного же рода существует и между двумя величинами, имеющими одну и ту же размерность. Наконец, когда некоторые причины производят известные действия, то элементы симметрии причин должны проявиться в произведенных действиях. Точно так же при составлении уравнения, описывающего какое-нибудь физическое явление, связь между причиной и действием выражается согласованием между величинами, входящими в обе части уравнения, и эти обе части должны быть одинаковой размерности.

II. *Операции совмещения и элементы симметрии.* Установление различных видов симметрии может быть разбито на два больших раздела соответственно тому, идет ли речь об определении симметрии некоторой ограниченной системы, или системы, которую можно считать неограниченной. Мы здесь займемся только конечными системами.[2]

Рассмотрим для примера некоторую систему, определенную с помощью некоторых заданных аналитических величин и трех прямоугольных координатных осей. Система будет обладать известной симметрией, если при использовании каких-либо других прямоугольных осей координат она окажется опять определенной такими же аналитическими величинами.

Элементы (точки, прямые, плоскости и пр.), определяемые одинаковыми аналитическими величинами и отнесенные к этим различным группам осей, суть гомологичные элементы, или элементы одного и того же рода.

Та операция, которая производит переход от первой системы ко второй, будет некоторой *операцией совмещения.*[3]

---

[2] Теория строения кристаллических тел есть не что иное, как общая теория симметрии неограниченной среды, обладающей периодической структурой. Эта замечательная теория была создана Бравэ (A. B r a v a i s. Etudes cristallographiques. Paris, 1866), Жорданом (C. J o r d a n. Sur les groupes de mouvements. Annali di Matematica, 167, 1868; 322, 1869) и Федоровым (Зап. СПб. минералог. общ., 1879—1884; Zs. f. Kristallogr., 20, 25, 1882). В последнее время Шёнфлис издал превосходный учебный курс этой теории (A. S c h ö n f l i e s. Kristallsysteme und Kristallstruktur. Leipzig, 1891).

Кристаллические тела можно разделить на 32 группы, если рассматривать только симметрию внешней формы; но для внутренней структуры этих веществ теория предсказывает существование 230 различных типов симметрии. Если все эти типы окажутся действительно существующими в природе, это будет настоящим сокровищем для физиков, так как тогда они будут иметь в своем распоряжении 230 сред, обладающих различными типами симметрии.

[3] *Deckoperation* немецких кристаллографов.

Существует два рода прямоугольных осей координат, симметричных одна другой. Мы будем иметь в системе операцию совмещения первого рода, если эта операция воспроизводит переход одной системы осей в другую, тождественную первой. Эта операция тогда эквивалентна простому перемещению в пространстве. В системе имеет место повторяемость одинаковых элементов.

Мы будем иметь операцию совмещения второго рода или просто симметрическое преобразование, если эта операция воспроизводит переход некоторой системы осей в другую, симметричную первой. Система тогда тождественна своему изображению, получаемому с помощью зеркала.

Легко показать, что при операции совмещения ограниченной системы по крайней мере одна точка всегда остается неподвижной в пространстве. Отсюда вытекает, что установить все возможные типы симметрии конечной системы значит установить все типы симметрии около некоторой точки, которая представляет собой центр фигуры системы.

Операции совмещения первого рода всегда могут быть получены путем простого поворота вокруг некоторой оси повторяемости (более общо называемой *осью симметрии*), проходящей через эту точку. Ось порядка q (где q — целое число) будет совмещать систему при углах поворота на $0, 1, 2, \ldots, (q-1)$ раз $\frac{2\pi}{q}$,

У каждой оси системы мы будем рассматривать ее ориентацию и направление; это удвоит число осей, так как на каждой оси мы будем предполагать существование двух направлений, противоположных друг другу.

Если с точки зрения повторяемости эти две оси противоположного направления суть оси разного рода (например, ось правильной пирамиды) и имеют порядок q, то мы обозначим их через (L_q, l_q). Если эти две оси противоположного направления суть оси того же рода по повторяемости (например, главная ось призмы) и имеют порядок q, то мы их обозначим через $(2L_q)$. Мы имеем тогда двустороннюю ось. В этом случае в системе по необходимости существует ось повторяемости четного порядка, перпендикулярная этой двусторонней оси, которая позволяет перевернуть эту последнюю саму на себя путем поворота на 180° и которая представляет собой часть операций совмещения системы.

Операции совмещения второго рода всегда могут быть получены с помощью зеркального отражения, сопровождающегося поворотом вокруг оси, перпендикулярной плоскости отражения. Следует рассмотреть несколько случаев:

1°. Поворот равен нулю; имеется одно простое отражение, и система обладает плоскостью симметрии P.

2°. Поворот равен 180°, имеется центр симметрии C.

3°. Ось, перпендикулярная плоскости, есть ось повторяемости порядка q и имеется q симметрических преобразований; каждая из этих операций

состоит из одного зеркального отражения, сопровождаемого одним из поворотов

$$0,\ \frac{2\pi}{q},\ 2\frac{2\pi}{q},\ \ldots,\ (q-1)\frac{2\pi}{q},$$

тогда имеем простую плоскость симметрии q-го порядка, которую мы обозначим через P_q.

4°. Ось, перпендикулярная плоскости, есть ось повторяемости q-го порядка и имеется q симметрических преобразований; каждая из этих операций состоит из одного зеркального отражения, сопровождаемого одним из вращений

$$\frac{1}{2}\cdot\frac{2\pi}{q},\ \left(1+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q},\ \left(2+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q},\ \ldots,\ \left(q-1+\frac{1}{2}\right)\frac{2\pi}{q}$$

вокруг оси. Тогда имеем плоскость перемежающейся симметрии q-го порядка; мы ее обозначим через Π_q [3].

Модель, изображенная на рис. 1, обладает одной осью 4-го порядка и плоскостью простой симметрии 4-го порядка P_4. Четыре нижние стрелки получаются путем простого зеркального отражения верхних четырех стрелок и наоборот. Система восстанавливается в прежнем виде либо простым зеркальным отражением, либо таковым, сопровождаемым поворотом несколько раз на угол 90°.

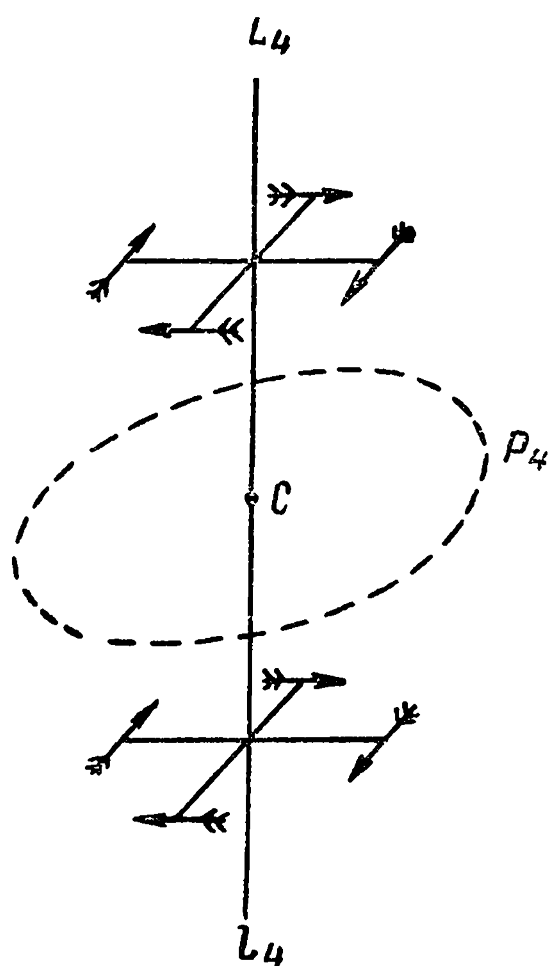


Рис. 1.

Модель (рис. 2) имеет одну ось 4-го порядка и перпендикулярную ей одну плоскость Π_4 перемежающейся симметрии 4-го порядка. Четыре нижние стрелки чередуются по положению с изображениями четырех верхних стрелок, получающихся путем простого зеркального отражения. Система восстанавливается с помощью зеркального отражения, сопровождаемого поворотом на нечетное число раз по 45°.

Можно заметить, что модель рис. 2 может быть совмещена со своим изображением, видимым в зеркале, хотя она и не обладает ни плоскостью, ни центром симметрии. Она имеет только плоскость перемещающейся симметрии.[4]

III. *Группы операций совмещения.* Все операции совмещения какой-либо системы определяются элементами симметрии, которые мы только что перечислили.

---

[4] P. Curie, Bull. de la Soc. mineral., 7, 89, 418, 1884. [Наст. изд., стр. 49 и 66].

Одной группой операций совмещения будет сочетание таких операций, когда две какие-нибудь операции, проведенные последовательно, дадут такой же результат, как и тот, который получается с помощью одной единственной операции, составляющей часть группы.

Мы даем здесь полную таблицу всех групп операций совмещения около некоторой точки [см. стр. 100]. Эти операции полностью определяются перечислением элементов симметрии.

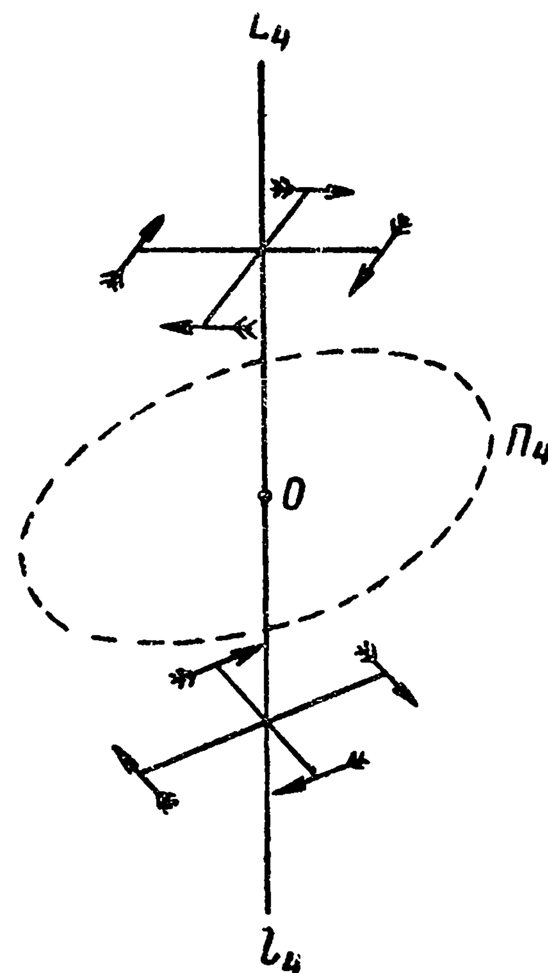


Рис. 2.

Мы видим, что группы симметрии могут быть разделены на семь классов, отличающихся один от другого природой группы осей, которую они содержат. Каждый класс может существовать, имея так называемое собственно симметрическое преобразование или не имея его.

Существует, вообще говоря, несколько способов представления собственно симметрии в группу, содержащую только оси. Получается всего 19 семейств f. Рассмотрим для примера класс III и положим $q=3$; получим группу осей $2L_3$ $(3L_2, 3L_2')$, т. е. одну главную двустороннюю ось третьего порядка с тремя двойными осями и оси противоположного направления другого рода $3(L_2, L_2')$. Эти три оси перпендикулярны главной оси и образуют между собой углы в 120°. Такая система может существовать без других элементов симметрии (семейство (8), кристаллическая форма кварца) или с одной плоскостью симметрии 3-го порядка, перпендикулярной главной оси (P_3), и с тремя плоскостями симметрии $3\ P$, проходящими через главную ось и через двойные оси (семейство (9), треугольная призма). Можно также получить некоторую симметричную систему (семейство (10), ромбоэдр) с плоскостью перемежающейся симметрии Π_3, нормальной главной оси, с тремя плоскостями симметрии, проходящими через главную ось и нормальными двойными осями и с центром симметрии.

Каждое семейство классов II и III содержит бесконечное число групп; q может быть любым целым числом. Каждое семейство других классов содержит только по одной группе.

Семейства (5) и (9) имеют центр симметрии, если q есть четный порядок.

Семейства (6) и (10) имеют центр симметрии, если q есть нечетный порядок.

В классе III оси L_2 и L_2' совпадают, но имеют противоположное направление, если q нечетно. Наоборот, если q четно, то имеются двусторонние двойные оси обоих родов.

Значения N определяют порядок каждой группы. N есть число гомологических друг другу точек в системе, когда рассматриваемые точки не

Класс	Оси повторяемости	f	Симметрические преобразования	N	Примеры
I	Осей нет.	1	O	1	—
		2	P	2	—
		3	C	2	Параллелепипед.
II	L_q, l_q (ось и обратная ей)	4	O	q	$q = 2$, виннокаменная кислота.
		5	P_q	$2q$	$q = 2$, гипс. $q = 6$, апатит. $q = \infty$ магнитное поле.
		6	Π_q	$2q$	$q = \infty$ магнитное поле. $q = 3$, диоптаз.
		7	qP	$2q$	$q = 3$, турмалин. $q = \infty$, электрическое поле, усеченный конус.
III	$2L_q$, qL_2, ql_2 (двусторонняя главная ось)	8	O	$2q$	$q = 3$, кварц. $q = \infty$, закрученная нить.
		9	P_q, qP	$4q$	$q = 3$, правильная треугольная призма. $q = \infty$ прямой круговой цилиндр.
		10	Π_q, qP	$4q$	$q = \infty$ прямой круговой цилиндр. $q = 3$, ромбоэдр, шпат. $q = 2$, сфеноэдр.
IV	$4(L_2, l_2)$, $6L_2$ (оси правильного тэтраэдра)	11	O	12	Хлорат натрия
		12	4Π, $3P_2$, C	24	Пирит.
		13	$3\Pi_2$, $6P$	24	Правильный тетраэдр, цинковая обманка.
V	$6L_4$, $8L_3$, $12L_2$ (оси куба)	14	O	24	Куприт.
		15	$3P_4$, $4\Pi_2$, $6P_2$, C	48	Куб, правильный октаэдр.
VI	$12L_5$, $20L_3$, $30L_2$ (оси правильного икосаэдра)	16	O	60	Икосаэдр.
		17	$6\Pi_5$, $10\Pi_3$, $15P_2$, C	120	Правильный додекаэдр.
VII	∞L_∞ (оси шара)	18	O	∞	Шар, наполненный жидкостью, обладающей вращательной способностью.
		19	∞P_∞, C	∞	Шар.

В этой таблице:

(L_q, l_q) обозначает ось q-го порядка и ось другого рода обратного направления; (L_q) — двусторонняя ось порядка q; C — центр симметрии; P - плоскость симметрии; P_q — плоскость простой симметрии q-го порядка; Π_q — плоскость перемежающейся симметрии q-го порядка.

расположены ни на какой-либо оси и ни в какой-либо плоскости симметрии. N есть также число систем прямоугольных осей координат, в которых эти системы представляются в том же виде.

Системы, имеющие симметрию семейств (1), (4), (8), (11), (14), (16) и (18), содержащие только оси, не способны совмещаться со своими изображениями, полученными путем зеркального отражения; они обладают энантиоморфной диссимметрией.[5]

Весьма важным понятием с интересующей нас точки зрения является понятие подгруппы.

Некоторая группа элементов симметрии представляет собой подгруппу некоторой более высокой группы симметрии, если все операции совмещения первой группы составляют часть операций совмещения второй. Так, например, группа (13) с тетраэдрической симметрией есть подгруппа группы (15) с кубической симметрией. Группа (L_6, l_6'), $6P$ семейства (7) (симметрия правильной гексагональной пирамиды) представляет собой подгруппу группы $\frac{2L^6}{P_6}$, $\frac{6L_2,\ 6L'_2}{6P_2}\ C$ семейства (9) (правильная гексагональная призма). Группа (4) представляет собой подгруппу групп (5), (6), (7), (8), (9), (10) для одинаковых значений q, и т. д.

IV. *Характеристическая диссимметрия физических явлений.* Рассмотрим теперь какую-нибудь точку среды, находящейся в каком-нибудь физическом состоянии.

Симметрия в этой точке обязательно будет характеризоваться одной из групп предшествующей таблицы.[6]

Выскажем следующие положения:

Характеристическая симметрия некоторого явления есть максимальная симметрия, совместимая с существованием явления. Явление может существовать в среде, обладающей своей характеристической симметрией или симметрией одной из подгрупп его характеристической симметрии. Иными словами, *некоторые элементы симметрии могут сосуществовать с некоторыми явлениями, но это не обязательно. Необходимо, чтобы некоторые элементы симметрии отсутствовали. Это и есть та диссимметрия, которая создает явление.*

---

[5] Более полные детали см.: Курсы кристаллографии. См. также: A. Bravais. Etudes cristallographiques. Paris, 1866; C. Jordan. Sur les groupes de mouvements. Annali di Matematica, 167, 1868; см. прим. 4, стр. 98.

[6] У некоторых может возникнуть сомнение в правильности переноса на среду, находящуюся в некотором физическом состоянии, классификации, установленной первоначально с точки зрения чистой геометрии. Заметим, что все рассуждения, служащие для установления групп, можно свести к следующей форме: пусть A, B, C суть три системы прямоугольных координатных осей, в которых система представляется в одной и той же форме. Пусть D есть четвертая система прямоугольных осей координат, которая расположена относительно C таким же образом, как B по отношению к A; тогда D также будет некоторой системой осей координат, в которой указанная система будет изображаться в том же виде, как и в A, B, C. Такой способ рассуждения не предрешает совершенно природы системы.

Было бы гораздо логичнее назвать *плоскостью диссимметрии* всякую плоскость, которая не есть плоскость симметрии, *осью диссимметрии* — всякую ось, которая не есть ось симметрии и т. д., и вообще составить список операций, которые не представляют собой операций совмещения в этой системе. Именно эти операции указывают на диссимметрию и, следовательно, на одно из возможных свойств системы. Но в рассмотренных нами группах имеется бесконечное число операций, не приводящих к совмещению, и, вообще говоря, только конечное число операций совмещения, поэтому гораздо проще составить список этих последних операций.

Можно также видеть, что при наложении нескольких явлений различной природы в одной и той же системе их диссимметрии складываются. Элементами симметрии системы остаются только те, которые являются общими для каждого явления, взятого отдельно.

Когда некоторые причины производят некоторые действия, элементы симметрии причин должны обнаруживаться в этих произведенных действиях.

Когда некоторые действия проявляют некоторую диссимметрию, то эта диссимметрия должна обнаруживаться и в причинах, их порождающих.

Положение, обратное этим двум, несправедливо, по крайней мере практически, т. е. произведенные действия могут быть более симметричными, чем причины. Некоторые причины диссимметрии могут не оказывать влияния на некоторые явления или по крайней мере могут иметь настолько слабое действие, что его нельзя обнаружить, а это практически равносильно отсутствию действия.

С точки зрения физических явлений представляет интерес рассмотреть отдельно группы, содержащие одну ось изотропии. Число этих групп равно пяти; обозначим их через (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) и (*e*).

(*a*) $\dfrac{2L_\infty}{P_\infty}$, $\dfrac{\infty L_2}{P_2}$, C.

Пример: цилиндр, тело, сжатое в некотором направлении.

(*b*) $2L_\infty$, ∞L_2.
Закрученный цилиндр.

(*c*) $(L_\infty,\ l_\infty)$, ∞P_1.
Усеченный конус, электрическое поле.

(*d*) $\dfrac{(L_\infty,\ l_\infty)}{P_\infty}$, C.
Вращающийся цилиндр, магнитное поле.

(*e*) $(L_\infty,\ l_\infty)$.

Цилиндрическая группа (*a*) — наиболее симметричная группа, она обладает элементами симметрии прямого кругового цилиндра, т. е. имеет двустороннюю ось изотропии $2L_\infty$ с бесконечным числом двойных двусторонних осей ∞L_2, перпендикулярных к главной оси, и проходящих через центр фигуры, плоскость прямой симметрии P_∞ бесконечного порядка,

перпендикулярную к главной оси, бесконечное число плоскостей прямой симметрии ∞P_2 2-го порядка, проходящих через главную ось, центр симметрии C.

Если сжимать в некотором направлении изотропное тело, то оно становится анизотропным и приобретает симметрию цилиндрической группы (a). Известно, что сжатое таким образом тело имеет оптические свойства кристаллов с одной оптической осью; симметрия (a) есть максимальная симметрия, совместимая с существованием этого явления. Кристаллические тела с одной оптической осью обладают видами симметрии, которые представляют собой подгруппы симметрии (a).

Другие группы (b), (c), (d), (e) с осью изотропии суть подгруппы цилиндрической группы (a).

Группа (b) всегда обладает двусторонней осью изотропии и двойными осями, но она уже не имеет ни центра, ни плоскостей симметрии. Группа (b) есть полноосная подгруппа группы (a). Группа (b) имеет симметрию цилиндра или нити, закрученной вокруг своей оси.

Это центральная симметрия фигуры системы, образованной из двух тождественных цилиндров, оси которых являются продолжением одна другой, и вращающихся одновременно с равными угловыми скоростями в противоположных направлениях. Симметрия кручения (b), содержащая только оси повторяемости, обладает тем видом не могущей быть наложенной диссимметрии (энантиоморфностью), которая необходима для возникновения обычного вращения плоскости поляризации в активных телах. Можно также сказать, что симметрия (b) осуществляется тогда, когда мы наполним цилиндр жидкостью, обладающей вращением плоскости поляризации. Кристаллическая форма кварца $2L_3$, $3(L_3, L_2')$ обладает симметрией подгруппы (b).

Группа (c) обладает осью изотропии и осью противоположного направления другого рода (L_∞, l_∞); эта ось, следовательно, уже не является двусторонней (иначе говоря, эта ось уже не представляется одинаковой с обоих концов). Группа (c) имеет еще бесконечное число плоскостей симметрии, проходящих через ось изотропии; но она уже не имеет ни плоскости симметрии, ни двойных осей цилиндрической группы. Такая симметрия в некоторой степени свойственна оси прямоусеченного кругового конуса. Это симметрия силы, скорости, симметрия поля, в котором действует всемирное тяготение; это также симметрия электрического поля. С точки зрения симметрии все эти явления очень удобно изображать стрелкой.

Рассмотрим, например, поле всемирного тяготения; материальная сфера M, центр которой находится в точке O, действует на внешнюю точку A так, что создает там поле, в котором может проявляться действие ньютоновского притяжения. Если предположить, что само по себе вещество тела M не вносит никакой диссимметрии, то мы видим, что линия OA есть ось изотропии и что всякая плоскость, проходящая через OA, есть

плоскость симметрии, и в этом заключаются единственные элементы симметрии, проходящие через точку A. А это есть симметрия группы (c).

Следовательно, поле ньютоновского тяготения может встречаться в среде, обладающей симметрией (c) или одной из ее подгрупп; впрочем, нельзя представить, чтобы эта симметрия могла быть выше (c), так как в этом случае она должна была бы стать симметрией цилиндрической группы (a) или сферической группы (19), а при этом поле не имело бы определенного направления; то же относилось бы к силам и скоростям. Если мы поместим в A материальную сферу, то возникнет сила, действующая на эту материю. Тело сможет прийти в движение в направлении AO и приобрести некоторую скорость; при этом ничто не будет нарушать симметрии системы; следовательно, (c) представляет одновременно и симметрию силы, действующей на весомую материю, и симметрию материи, обладающей некоторой скоростью.

Чтобы установить симметрию электрического поля, предположим, что это поле создано двумя круглыми пластинками цинка и меди, поставленными одна против другой, как обкладки воздушного конденсатора. Рассмотрим между этими пластинками некоторую точку их общей оси; мы видим, что эта ось есть ось изотропии и что всякая плоскость, проходящая через эту ось, есть плоскость симметрии. Элементы симметрии причин должны проявляться в производимых действиях; таким образом, электрическому полю соответствует симметрия (c) и ее подгруппы.

Группа (a) с цилиндрической симметрией и группа (19) с шаровой симметрией суть единственные группы, имеющие в качестве подгруппы (c). Поэтому невероятно, чтобы электрическое поле могло иметь симметрию более высокую, чем (c). Это последнее утверждение может, впрочем, быть доказано строго, если мы примем, как мы это уже видели выше, что сила, действующая на весомое тело, сама имеет характеристическую симметрию группы (c).

В самом деле, предположим, что некоторая электрически заряженная проводящая сфера изолирована в пространстве и что какая-либо причина возбуждает электрическое поле. На сферу будет действовать сила в направлении поля. Диссимметрия действий должна обнаружиться в причинах, ее породивших; так как сила не обладает осью симметрии, перпендикулярной к своему направлению, то система заряженной сферы и поля также не должна обладать этим элементом симметрии. Но заряженная сфера, рассматриваемая изолированно, обладает осями изотропии во всех направлениях; диссимметрия, о которой идет речь, обусловливается, следовательно, электрическим полем, которое не должно обладать осью симметрии, перпендикулярной к его направлению. Итак, электрическое поле не может иметь цилиндрической или шаровой симметрии, а его характеристическая симметрия есть симметрия группы (c). Симметрия электрического тока и симметрия диэлектрической поляризации обязательно будут такими же, как и симметрия поля, порождающего эти явления.

Пироэлектрические и пьезоэлектрические явления дают новые подтверждения предыдущих заключений, касающихся характеристической симметрии электрического поля. Например, кристалл турмалина электрически поляризуется в направлении своей тройной оси, если его нагревать или если его сжимать в направлении этой оси. Но ни нагревание, ни это сжатие нисколько не изменяют симметрии кристалла (L_3, l_3) $3P$, обладающего тройной осью (с осью противоположного направления другого рода), через которую проходят три плоскости симметрии; это подгруппа (*c*) с (L_∞, l_∞) ∞P; следовательно, эта симметрия совместима с существованием диэлектрической поляризации вдоль этой оси.

Заметим, наконец, что электрическое поле создает в жидкостях такие же оптические явления, как те, которые создаются при сжатии твердых тел (явление Керра). Характеристическая симметрия этих явлений — это цилиндрическая симметрия (*a*), подгруппой которой является группа (*c*); мы видим, следовательно, что лишь часть характеристической диссимметрии электрического поля проявляется в явлении Керра. Явлениям электрического расширения (явление Дютера) также соответствует только диссимметрия группы (*a*) [4].

Группа (*d*) обладает осью изотропии и осью противоположного направления другого рода (L_∞, l_∞); эта ось, следовательно, не сдваивается при повторяемости; однако эта система обладает центром симметрии и плоскостью симметрии бесконечного порядка, перпендикулярной к оси. Оси L_∞ и l_∞ противоположных направлений, однако взаимно симметричны, и можно сказать, что ось изотропии сдвоена по симметрии. Группа не имеет ни двойных осей, ни плоскостей симметрии, проходящих через главную ось цилиндрической группы (*a*). Группа (*d*) дает симметрию в центре прямого кругового цилиндра, вращающегося вокруг своей оси с некоторой скоростью. К этой симметрии следует также отнести пару сил, угловую скорость, магнитное поле.

Установим, например, характеристическую симметрию магнитного поля. Для этого рассмотрим магнитное поле, существующее в центре окружности, по которой протекает электрический ток; поле направлено перпендикулярно к плоскости окружности. Будем искать симметрию причины, т. е. симметрию в центре окружности, по которой протекает ток. Прежде всего мы будем иметь ось изотропии, перпендикулярную к плоскости тока. Электрический ток совместим с существованием плоскости симметрии, проходящей через направление тока; следовательно, плоскость окружности будет плоскостью симметрии. Электрический ток не допускает ни оси повторяемости, ни плоскости симметрии, перпендикулярной к его направлению. Следовательно, не существует ни оси в плоскости окружности, ни плоскостей симметрии, проходящих через ось изотропии. Симметрия причин относится, таким образом, к группе (*d*) $\frac{L_\infty,\ l_\infty}{P_\infty}$, C. Эти элементы симметрии совместимы с наличием магнитного поля,

проходящего по оси изотропии, поскольку элементы симметрии причин проявляются в порождаемых действиях.

Как видим, магнитное поле может обладать плоскостью симметрии, нормальной к его направлению. Наоборот, магнитное поле несовместимо с присутствием двойной оси, нормальной к его направлению. Чтобы это показать, мы воспользуемся явлениями индукции. Рассмотрим, например, прямолинейную проволоку, движущуюся с некоторой скоростью перпендикулярно к ее направлению. Такая система обладает двойной осью в направлении скорости.

Предположим теперь, что существует магнитное поле в направлении, перпендикулярном и к проволоке и к скорости перемещения; в проволоке возникает электродвижущая сила индукции. Это явление несовместимо с существованием двойной оси, направленной вдоль перемещения, т. е. перпендикулярно к проволоке. Диссимметрия действий должна обнаруживаться в причинах; необходимое исчезновение двойной оси, о котором мы говорили, может происходить только от присутствия магнитного поля; следовательно, оно не может иметь двойной оси, перпендикулярной к его направлению. (Такое же доказательство можно было бы привести, рассматривая круговой контур, перпендикулярный к магнитному полю. Следовало бы предположить, что этот контур расширяется без изменения формы, создавая ток индукции).

Цилиндрическая (*a*) и сферическая (19) группы имеют подгруппу (*d*), однако существование взаимно-перпендикулярных осей в этих группах показывает, что они не могут годиться для представления симметрии магнитного поля. Таким образом, магнитное поле совместимо единственно только с группой (*d*) и ее подгруппами.[7]

Явление магнитного вращения плоскости поляризации также может подтвердить это заключение.[8]

Магнитно-поляризованное тело обладает такой же симметрией, что и магнитное поле.

Явления магнитного расширения железа обнаруживают только диссимметрию цилиндрической группы (*a*), в которую (*d*) входит как подгруппа.

---

[7] См.: P. Curie, Bull. de la Soc. minéral., **7**, 89, 1884, а также: Arch. de Sci. phys. et natur., **29**, 337, 1893.

Лорд Кельвин высказал предположение, что намагничение обязано деформации некоторой особой среды. Эта деформация есть просто некоторое вращение, которое в этой совсем особой среде вызывает появление противодействующей упругой пары сил. См. заметку Бриллюэна в «Traduction des conférences de Sir W. Thomson». Это представление находится в полном согласии с вышеуказанной симметрией.

[8] Чтобы надлежащим образом рассмотреть вопрос о вращении плоскости поляризации с точки зрения симметрии, нужно обратиться к элементам симметрии, свойственным неограниченным средам, о которых мы ничего не говорили. Так, например, тело, через которое проходит луч света, поляризованный по кругу, обладает винтовой (helicoidal) осью изотропии.

Большое число кристаллов характеризуется группами симметрии, которые представляют собой подгруппы магнитной симметрии, такие, например, как кристаллы апатита $\frac{L_6,\ l_6}{P_6}C$, гипса, хлористого железа, роговой обманки $\frac{L_2,\ l_2}{P_2}C$. Могло бы случиться, что эти кристаллы намагничивались естественным путем благодаря своему строению; я безуспешно пытался обнаружить такое намагничивание на опыте.

Обычно магнитное поле изображают стрелкой; такое изображение, которое часто не вносит каких-либо неудобств, неправильно с точки зрения симметрии, так как магнитное поле не изменяется при зеркальном отражении от плоскости, перпендикулярной к его направлению, и изменяется по знаку при отражении от плоскости, проходящей через его направление. Это как раз обратно тому, что происходит с изображающей стрелкой.

Группа (*e*) имеет только простую не двустороннюю ось изотропии (L_∞, l_∞). Группа (*e*) есть общая подгруппа четырех групп (*a*), (*b*), (*c*), (*d*); она обладает объединенной диссимметрией этих четырех групп. Следовательно, она совместима с существованием явлений, имеющих в качестве характеристической симметрии симметрию какой-нибудь одной из четырех других групп.

Группа (*e*) обладает энантиоморфной диссимметрией.

Пять групп (*a*), (*b*), (*c*), (*d*), (*e*) связаны между собой подобно типам симметрии одной и той же кристаллической системы. Если мы воспользуемся языком кристаллографии, то мы скажем, что группа (*a*) дает полную или голоэдрическую симметрию цилиндрической системы. Группа (*b*) соответствует полноосной гемиэдрии (плагиэдрической или энантиоморфной гемиэдрии). Группа (*c*) соответствует гемиморфной гемиэдрии (гемиэдрией с косыми гранями). Группа (*d*) соответствует парагемиэдрии (гемиэдрией с параллельными гранями). Наконец, группа (*a*) соответствует тетартоэдрии.

Хотя каждая группа содержит бесконечное число преобразований совмещения, все же можно сказать, что группы (*b*), (*c*) и (*d*) содержат только половину, а группа (*e*) — четверть операций совмещения группы (*a*).

Модель, представленная на рис. 3—7, дает для различных ориентаций стрелок различные подгруппы с главной осью 4-го порядка групп (*a*), (*b*), (*c*), (*d*), (*e*).

Рис. 3 дает (семейство (9), $q=4$) подгруппу цилиндрической группы (*a*); это симметрия прямой призмы с квадратным основанием. Через главную ось проходит четыре плоскости симметрии, две плоскости первого рода проходят через стрелки, а две другие — второго рода — суть биссектрисы углов, образуемых между собой первыми плоскостями. Положения двусторонних бинарных осей L_2 и L_2' и плоскости P_4, перпендикулярной к оси, изображены на рисунке.

Рис. 4 (энантиоморфное семейство (8), $q=4$) дает подгруппу симметрии кручения (b); это симметрия кристалла сульфата стрихнина.

Рис. 5 (семейство (7), $q=4$) дает подгруппу симметрии электрического поля (c); имеется четыре плоскости симметрии, проходящие через эту ось; это в точности тип симметрии кристалла каламина, который одновременно является и пьезоэлектрическим и пироэлектрическим.

Рис. 6 (семейство (5), $q=4$) дает подгруппу магнитной симметрии (d); это симметрия кристаллов шеелита и эритрита.

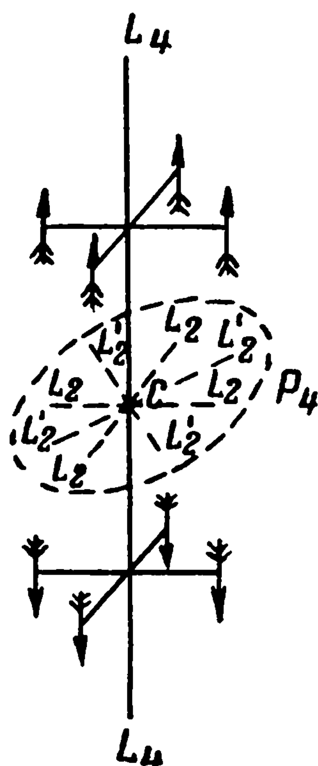


Рис. 3.

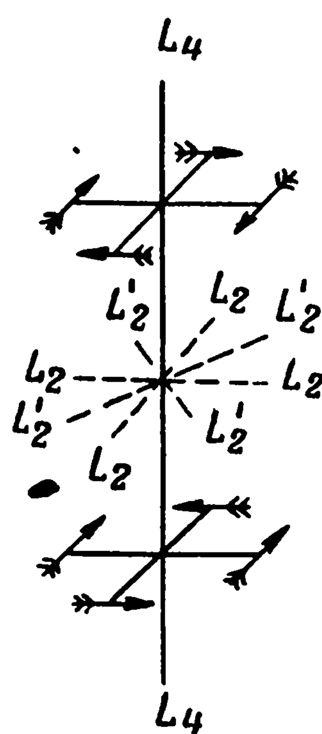


Рис. 4.

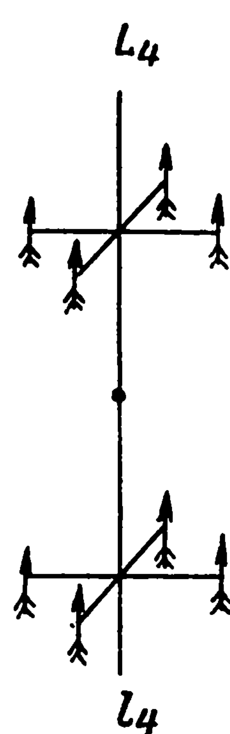


Рис. 5.

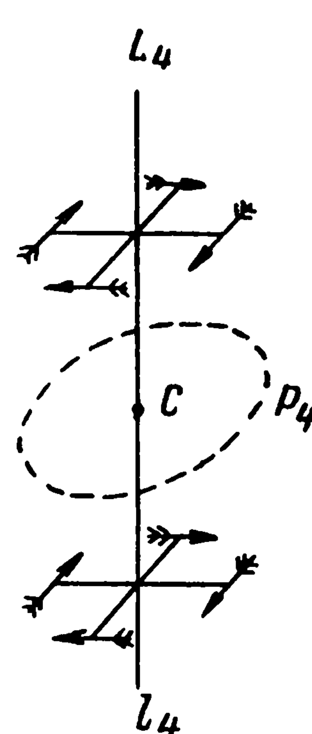


Рис. 6.

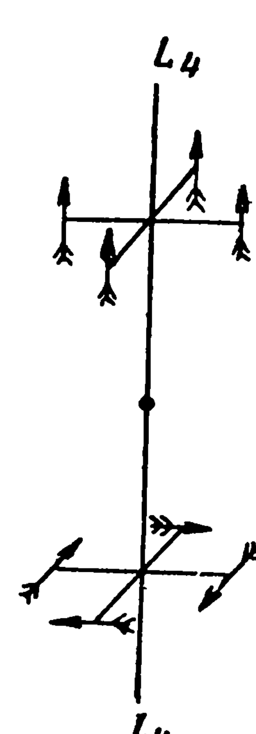


Рис. 7.

Наконец, рис. 7 (энантиоморфное семейство (4), $q=4$) дает подгруппу группы (e) с изотропной осью (кристалл пентаэритрита). На рис. 7 нижние стрелки передают диссимметрию магнитного поля, а верхние — электрического поля. Объединение этих стрелок приводит к представлению о диссимметрии кручения, так как подвижное тело, которое поворачивалось бы вокруг оси в направлении нижних стрелок и в то же время перемещалось бы параллельно оси в направлении верхних стрелок, описывало бы винтовую линию.

V. *Наложение причин диссимметрии в одной и той же среде.* Когда два явления разной природы налагаются в одной и той же среде, то их диссимметрия складывается. Если наложить причины диссимметрии двух из трех групп (b), (c), (d), совмещая при этом их оси изотропии, то получим группу (e), ибо ось изотропии будет единственным элементом симметрии, общим для обеих налагаемых групп. Группа (e) обладает объединенной диссимметрией этих трех групп. Таким образом, заставляя в указанном выше смысле совпадать причины диссимметрии двух групп из трех (b), (c), (d), мы получим характеристическую диссимметрию третьей группы.

Предположим, например, что мы наложили бы друг на друга в одном теле электрическое поле (c) и магнитное поле (d) с тем же направлением; тогда сохранится только ось изотропии; наличие электрического поля

несовместимо с существованием центра и плоскости симметрии, перпендикулярной к этой оси, а наличие магнитного поля сделало бы неизбежным исчезновение плоскостей симметрии, проходящих через ось. Таким образом, получается симметрия (*e*), т. е. симметрия подгруппы (*b*); мы, следовательно, получим в теле диссимметрию кручения. Если, например, взять железную проволоку, намагнитить ее в направлении длины, а потом пропустить по ней ток, то проволока закрутится (опыт Видеманна) [5].

Вероятно, можно создать среду, способную проявить вращательную поляризацию активных тел, если наложить в симметричном теле электрическое и магнитное поля. Во всяком случае это не находилось бы в противоречии с условиями симметрии. В направлении оси можно было бы получить наложение магнитного вращения плоскости поляризации (т. е. такого, которое меняет направление при изменении направления распространения света) и естественного вращения плоскости поляризации. Перпендикулярно оси можно было бы иметь в чистом виде явление обычного вращения плоскости поляризации. Подобная среда с энантиоморфной симметрией, возможно, позволила бы еще осуществить некоторые диссимметричные химические реакции или разделить правые и левые тела в каком-нибудь рацемическом соединении, или, наконец, осадить из раствора в какой-то одной форме тела с симметричными молекулами, как например хлорноватокислый натр, который обычно осаждается в виде смешанных диссимметричных правых и левых кристаллов.

Наоборот, электрическое или магнитное поля в отдельности не могли бы вызвать диссимметричной реакции, так как эти явления совместимы с существованием плоскости симметрии.

Предположим теперь, что мы налагаем диссимметрию кручения (*b*) и магнитную диссимметрию (*a*); мы получим тогда симметрию (*e*), которая представляет собой подгруппу симметрии электрического поля (*c*).

Возьмем железную проволоку, намагнитим ее и закрутим. В момент, когда производится кручение, в проволоке возникает электродвижущая сила, и, если она образует замкнутый контур, по ней протекает ток (опыт Видеманна).

Условия симметрии указывают нам на возможность того, что тело с диссимметричными молекулами (обладающее обыкновенной вращательной способностью) будет диэлектрически поляризоваться, если поместить его в магнитное поле.

Предположим, наконец, что мы налагаем диссимметрию кручения (*b*) и электрическое поле (*c*); мы получим симметрию (*e*), представляющую собой подгруппу магнитной симметрии. Железная проволока, по которой протекает ток, намагничивается по длине, если ее закручивать (опыт Видеманна).

Условия симметрии позволяют нам вообразить, что тело с диссимметричными молекулами могло бы магнитно поляризоваться, если его поместить в электрическое поле.

Явление Холла. Предположим опять, что в одной и той же среде наложены электрическое (*c*) и магнитное (*d*) поля, но что оба поля направлены под прямым углом друг к другу. При таких условиях единственным общим для обоих полей элементом симметрии будет плоскость симметрии, параллельная направлению электрического поля и перпендикулярная магнитному полю. Таким образом, для всей симметрии имеем только плоскость P (группа (4)).

По обе стороны от этой плоскости эти явления должны быть симметричны, но в самой этой плоскости симметрия не определяет больше никаких свойств. Рассмотрим, например, систему из трех прямоугольных осей и металлическую прямоугольную пластинку, перпендикулярную оси Ox, которая проходит через центр пластинки, а стороны пластинки параллельны осям Oy и Oz.

Если по пластинке вдоль оси z протекает ток, то в направлении оси y не сможет быть электродвижущей силы, так как плоскость zOx есть плоскость симметрии тока и самой пластинки. Если же тока нет, но имеется магнитное поле, направленное по оси x нормально к пластинке, то не может быть тока также и по направлению оси y, так как ось x есть двойная ось для поля и для пластинки и, кроме того, имеется центр симметрии. Но если одновременно имеются магнитное поле по оси x и ток по оси z, то ось, центр и плоскость симметрии исчезают, и с точки зрения симметрии уже ничто не препятствует тому, чтобы вдоль оси y оказалась некоторая электродвижущая сила.

Теория распространения тепла и электричества в кристаллических телах (Стокс, Томсон, Миннигероде, Буссинек) [6] показывает, что для некоторых кристаллов надо принимать во внимание так называемые вращательные коэффициенты [7]. Речь идет о кристаллах семейств (5) $\frac{L_q, l_q}{P_q}$ и (6) $\frac{L_q, l_q}{\Pi_q}$ и их подгрупп (1), (2), (3) и (4).

Эти кристаллы имеют в крайнем случае ось q-го порядка, нормальную к плоскости прямой перемежающейся симметрии q-го порядка, где q есть какое-нибудь целое число.

Магнитно-поляризованное тело обладает симметрией (*d*) $\frac{L_\infty, l_\infty}{P_\infty}$, которая представляет собой предельный случай групп (5) и (6) при $q=\infty$. Все эти кристаллы, которые, согласно теории, могут иметь отличные от нуля вращательные коэффициенты, по типу симметрии относятся к одной из подгрупп магнитной симметрии.

Построенная для кристаллических тел теория прекрасно применяется и к магнитной симметрии, а существование вращательных коэффициентов объясняет все особенности явления Холла без того, чтобы вводить в теорию проводимости что-либо кроме симметрии поля.

Если подвести электричество к центру некоторого металлического диска, помещенного перпендикулярно магнитному полю, и это электричество собирать равномерно по краю диска, то линии, описываемые электрическим током, должны быть спиралями (Больцман) [9] [8].

Пироэлектрические и пьезоэлектрические явления. Пироэлектрические кристаллы по необходимости обладают симметрией подгруппы электрического поля, так как нагревание, предполагаемое однородным, само по себе не вносит никакой диссимметрии. Пьезоэлектрические кристаллы более многочисленны, чем пироэлектрические; действительно, в их число входят все последние и, кроме того, они заключают кристаллы, симметрия которых только под действием механических усилий становится ниже, чем симметрия электрического поля. Например, цинковая обманка (тетраэдрический кристалл) и кварц обладают симметрией, которая не представляет собой подгруппы электрического поля. Кварц обладает симметрией $2L_3$, $3(L_2, L_2')$, т. е. имеет тройную двустороннюю главную ось и три двойных односторонних оси, перпендикулярных первой. При сжатии, например, вдоль двойной оси к диссимметрии кварца добавляется цилиндрическая диссимметрия (a); из элементов симметрии остаются только (L_2, L_2'), двойная односторонняя ось, которая может принять направление электрической полярности.

Можно также показать, что сжимая кварц в направлении, перпендикулярном одновременно к одной двойной оси и к одной тройной оси, мы создаем полярнсcть также вдоль двойной оси, и что коэффициенты, характеризующие оба эти вида полярности, равны и обратны по знаку; можно также предсказать некоторые особенности явления; однако эти условия симметрии не являются единственными условиями, которые входят в общую теорию.[10]

VI. *Связи между характеристическими симметриями различных сред.* Мы предполагали, что аморфные вещества и вещества, не обладающие естественным вращением плоскости поляризации, сами по себе не вносят никакой диссимметрии в систему; мы неявно предполагали то же самое

---

[9] Весьма любопытно, что кристаллы, для которых была создана теория Стокса, оказываются тугоплавкими, и Соре безуспешно изучал влияния вращательных коэффициентов на теплопроводность в гипсе. Явление Холла было установлено только на металлах, а гипс — это диэлектрик. Вращательные коэффициенты, возможно, могли бы быть обнаружены в кристаллизованном металлическом теле, обладающем необходимой диссимметрией; но я не думаю, чтобы в действительности имелось бы вещество, пригодное для попытки проведения такого опыта.

О теории теплопроводности в кристаллах см. недавнюю статью Соре (Ch. Soret, J. de phys., (II), 2, 241, 1893). Лорд Кельвин первый заметил, что явление Холла указывает на существование вращательных членов (W. Thomson, Mathem. and Phys. Papers, 1, 281, 1882).

[10] Полная общая теория пьезоэлектрических свойств кристаллов была дана Фохтом (см.: W. Voigt, Allg. Ges. der Wissensch., Göttingen, 1890; Wied. Ann., 45, 523, 1892).

о среде, которая заполняет промежутки, лишенные материи. Это вполне естественное, но совершенно безосновательное положение необходимо; оно нам только показывает, что мы не можем иметь понятия об абсолютной симметрии; мы должны произвольно выбрать некоторую симметрию для одной среды и из нее выводить симметрию других сред. Впрочем, единственно только эта относительная симметрия нас и интересует.

Если, например, вся система обладает некоторой скоростью и мы рассматриваем некоторое тело A, входящее в эту систему, нам, вообще говоря, будет полезно знать только симметрию тела A по отношению к системе и не принимать во внимание общей диссимметрии, создаваемой состоянием движения всей системы.

Предположим, что в электричестве мы знаем только общие явления электростатики, электродинамики, магнетизма, электромагнетизма и индукции, тогда ничто нам точно не укажет на тот тип симметрии, который можно было бы приписать электрическому и магнитному полям. Мы могли бы, например, выбрать для магнитного поля симметрию (c) (которую мы выше приписали электрическому полю) и, рассуждая так же, как это мы делали раньше, неизбежно пришли бы к тому, чтобы для симметрии электрического поля принять группу (d) (которую мы выше приписали магнитному полю). В подобной системе не было бы ничего абсурдного и никакого противоречия с нашей исходной гипотезой о полной симметрии материи.

Общие явления электричества и магнетизма намечают нам только в общих чертах связь между симметрией электрического поля и симметрией магнитного поля, так что если для симметрии одного принимается (c), то для симметрии другого надо принять (d) и наоборот. Чтобы устранить эту неопределенность, нужно ввести в рассмотрение другие явления, например явления электрохимические или явления контактного электричества, пиро- или пьезоэлектрические явления, или также явление Холла, или магнитного вращения плоскости поляризации.

Пример неопределенности, совершенно сходной с той, которую мы только что отметили для симметрии электрических и магнитных сред, представляет собой размерность электрических и магнитных величин. Одних только общих явлений электричества и магнетизма недостаточно для устранения этой неопределенности: для этого нужно обратиться к другим явлениям, например к явлениям электрохимическим.[11]

VII. Итак, характеристическая симметрия явлений имеет бесспорный интерес. Мы видим, что с точки зрения применений из рассмотрения симметрии можно вывести заключения двух родов:

Заключения первого рода — основательные, но негативные, соответствующие неопровержимо верному положению: *нет действия без причины.*

---

[11] Абраам уже сделал попытку в этом направлении (см.: H. A b r a h a m, C. r., 116, 1123, 1893).

Действия — это явления, для возникновения которых всегда необходима некоторая диссимметрия. Если этой диссимметрии нет, то явление невозможно. Это часто предохраняет нас от заблуждений в поисках невозможных явлений.

Рассмотрение симметрии позволяет нам также сформулировать другого рода заключения, которые хотя и имеют позитивный характер, но не обладают той же степенью достоверности, что и заключения негативного характера. Они соответствуют положению: *нет причин без действия.* Действия — это явления, которые могут возникнуть в среде, обладающей некоторой диссимметрией; здесь мы имеем ценные указания, способствующие открытию новых явлений, но их предсказания не столь точны, как предсказания термодинамики. Мы не имеем никакого представления о порядке величины предсказываемых явлений; мы имеем только некоторое несовершенное представление об их природе. Это последнее замечание показывает, что следует остерегаться делать окончательные выводы из отрицательного опыта.

Рассмотрим, например, кристалл турмалина, который относится к подгруппе симметрии электрического поля. Отсюда заключают, что этот кристалл может быть электрически поляризован. Поместим кристалл в электрическое поле, ориентировав ось под углом 90° к полю; при этом совершенно не появляется ни поляризации, ни заметной по величине пары сил, действующей на кристалл. Можно было бы думать, что кристалл не поляризован или что если поляризация и существует, то она меньше той, которую можно было бы измерить. Тем не менее поляризация существует, и чтобы заставить ее проявиться, надо видоизменить опыт, например, равномерно нагреть кристалл, что, однако, ничего не изменяет в его симметрии.





XII

ОБ ОБРАЗОВАНИИ КРИСТАЛЛОВ И О КАПИЛЛЯРНЫХ ПОСТОЯННЫХ ИХ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНЕЙ [1]

В своей теории явлений капиллярности в жидкостях за исходную точку для межмолекулярных действий Гаусс принял гипотезу о центральных силах; он предположил, что молекулы действуют друг на друга только на чрезвычайно малых расстояниях; он ввел также в рассмотрение принцип виртуальных скоростей [2].

Он рассматривал виртуальные работы, производимые капиллярными силами, представив их в виде производной некоторой функции, и показал, что часть членов этой функции зависит только от объема жидкости, тогда как другая часть пропорциональна ее поверхности. Если предположить жидкость несжимаемой, то та часть, которая зависит от объема, остается неизменной. Другая же часть показывает, что виртуальные работы, совершаемые капиллярными силами, пропорциональны изменению поверхности.

В настоящее время эти соображения можно представить более элементарным и более общим способом, без необходимости обращаться к гипотезе о центральных силах. То, о чем мы собираемся говорить, применимо не только к жидкостям, но и к любым телам, деформируемым без изменения их свойств и их объема.

Пусть дано такое тело; если не принимать во внимание никаких внешних сил, помимо капиллярных, то внутренняя энергия будет одинаковой во всех элементах того же объема, достаточно удаленных от поверхности; напротив, у поверхности имеется весьма тонкий переходный слой, элементы объема этого слоя обладают средней энергией, заметно отличающейся от средней энергии внутренних элементов. Отсюда следует, что одна часть полной энергии пропорциональна объему, а другая часть пропорциональна этому переходному слою, т. е. его поверхности.

Когда такое тело деформируется, объемная энергия остается постоянной, а полная энергия изменяется пропорционально изменению поверхности.

Характеристическая капиллярная постоянная A поверхности раздела двух сред представляет собой ту энергию, которую надо затратить для увеличения на единицу этой поверхности раздела.

Если тело освобождено от действия всех сил, кроме капиллярных, то система стремится принять минимальную энергию, поверхность раздела стремится стать возможно меньшей и тело принимает сферическую форму.

Если несколько поверхностей раздела S, S_1, S_2 с капиллярными постоянными A, A_1, A_2 ограничивают тело, то его устойчивой формой будет та, которая даст минимум величине $AS+A_1S_1+A_2S_2$.

Рассмотрим теперь кристалл, находящийся в своем насыщенном маточном растворе, и предположим, что некоторые его части растворяются и отлагаются на других частях; кристалл, таким образом, изменяет свою форму без того, чтобы ни он, ни его маточный раствор не испытывали изменения своих свойств или объема. Если пренебречь совершенно незначительной работой, производимой силой тяжести, то энергия поверхности раздела кристалла и его маточного раствора будет единственной переменной величиной, а наиболее устойчивой формой будет та, для которой сумма поверхностных энергий имеет возможно наименьшее значение.

Каждому роду граней должна соответствовать особая капиллярная постоянная, ибо если бы это было не так, то кристалл, находясь в своем маточном растворе, стремился бы принять сферическую форму.

Преобладающей формой должна быть такая, которая образована гранями, капиллярные постоянные которых наименьшие.

Если принять эти положения, то мы можем тогда рассмотреть несколько проблем.

Проблема. *Положим, что некоторый кристалл в своем маточном растворе принял форму квадратной призмы; каково будет отношение стороны основания x к высоте y, которое бы характеризовало наиболее устойчивую форму?*

Обозначим через A капиллярную постоянную боковых граней и через B — таковую же основания. Энергия на боковой грани будет xyA, а энергия на основании — x^2B; для устойчивой формы величина

$$E = 4xyA + 2x^2B$$

должна быть минимальной.

Кроме того,

$$x^2y = V,$$

где V — постоянный объем кристалла; тогда

$$\frac{E}{2} = \frac{2AV}{x} + Bx^2$$

и

$$\frac{1}{4}\cdot\frac{dE}{dx}=-\frac{AV}{x^2}+Bx;$$

для минимума надо иметь

$$\frac{AV}{x^2}=Bx,$$

откуда

$$Ay=Bx$$

и

$$\frac{x}{y}=\frac{A}{B}.$$

В этом случае действительно имеем минимум, ибо тогда $\frac{d^2E}{dx^2}=12B$ есть положительная величина.

Проблема. *Положим, что некоторый кристалл принимает форму кубо-октаэдра; какова будет его устойчивая форма? A и B суть капиллярные постоянные кубических и октаэдрических граней.*

Пусть x есть то расстояние, на котором некоторая октаэдрическая грань пересечет ребро куба (расстояние отсчитывается начиная с вершины трехгранного угла куба, построенного на продолжении ребер b) [1]; для устойчивой формы будем иметь

$$x=\left(\frac{3}{2}-\frac{B}{A}\frac{\sqrt{3}}{2}\right)b.$$

Эта формула показывает, что кристалл будет иметь форму совершенного куба, если будем иметь

$$\frac{A}{B}<\frac{1}{\sqrt{3}},$$

что он будет иметь форму совершенного октаэдра, если будем иметь

$$\frac{A}{B}>\sqrt{3}$$

и что он примет форму абсолютно определенного кубо-октаэдра при всяком значении $\frac{A}{B}$, заключенном между $\frac{1}{\sqrt{3}}$ и $\sqrt{3}$.

Проблема. *Рассмотрим теперь несколько кристаллов, обладающих устойчивой формой и помещенных в один и тот же маточный раствор; что с ними произойдет?*

Совокупность кристаллов будет иметь минимальную энергию, когда их полная поверхность будет наименьшей; другими словами, когда все эти кристаллы соединятся в один.

По правде говоря, имеется и другой случай равновесия; это тот, когда все кристаллы станут равными между собой, но этот случай соответствует максимуму энергии и такое равновесие неустойчиво.

Таким образом, ответ на вопрос совершенно совпадает с результатом опытов; действительно, как известно, в насыщенном маточном растворе *самый большой из кристаллов съедает меньшие.*

Итак, вышеизложенная теория позволяет решить целый ряд вопросов; она основана лишь на общих принципах и, не делая никаких частных гипотез, не дает нам никаких точных знаний о механизме образования кристаллов. Всякая частная физическая теория, которая будет иметь целью объяснить этот механизм, прежде всего не должна будет находиться в противоречии с этой более общей теорией.

Эта теория предсказывает, что в насыщенном маточном растворе все кристаллы должны соединиться в один; она определяет размеры различных граней одного и того же кристалла; она указывает на возможность существования самых маленьких граней в совершенно устойчивой форме кристалла.

В заключение мы, тем не менее, укажем несколько ограничений указанной теории.

Когда кристалл омывается своим насыщенным маточным раствором при постоянной температуре, то вполне очевидно, что этот кристалл не будет изменяться по форме, если он уже имеет наиболее устойчивую форму; но если он обладает какой-либо другой формой, то будет ли он самопроизвольно изменять ее? Это представляется вероятным, но ответить на это может только опыт.

Несомненно, что кристалл стремится принять ту форму, которая соответствует минимуму энергии, и что он будет использовать все обстоятельства, которые ему для этого предоставлены; однако нигде не сказано, что он может это сделать самопроизвольно, находясь в своем маточном растворе.

Всякий раз как мы применяем принцип максимальной работы к системе, механизм которой нам недостаточно известен, нужно всегда спросить себя, не необходима ли некоторая определенная сила или небольшая предварительная работа, чтобы позволить произвести вычисленную наибольшую работу. Подобно тому как предмет, помещенный на край стола, не падает неизбежно, так и в химических явлениях большое число экзотермических соединений не образуется самопроизвольно [3].



МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ

XIII

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕЛ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ [1]

По своим магнитным свойствам тела разделяются на три различные группы:

1. Тела *диамагнитные*, включающие наибольшее число простых и сложных тел.

2. Тела *слабомагнитные* [2], в число которых входят кислород, двуокись азота, палладий, платина, марганец, а также соли марганца, железа, никеля, кобальта, меди, дидима.

3. Тела *ферромагнитные*, куда входят железо, никель, кобальт, магнетит (Fe_3O_4), а также сталь, чугун и различные сплавы.

С первого взгляда эти три группы резко различаются, но сохранится ли это различие после более глубокого их изучения? Существуют ли переходы между этими группами? Идет ли здесь речь о совершенно различных явлениях, или же мы имеем дело лишь с различными видоизменениями одного и того же явления? Эти вопросы сильно занимали Фарадея, который часто к ним возвращается в своих мемуарах. Ему мы обязаны весьма важным опытом по этому предмету: давно было известно, что железо теряет свои магнитные свойства при красном калении; Фарадей показал, что и при более высоких температурах железо остается магнитным, хотя и в слабой степени. Следовательно, одно и то же тело можно причислить к третьей и второй группам.

Независимо от всякой теории считают, что некоторое явление понятно в общих чертах, если наши знания о нем образуют связное целое, если между двумя заданными случаями мы можем вообразить себе весь ряд промежуточных случаев, сколь угодно близких друг к другу. Иначе пока еще обстоит дело с магнитными явлениями. Здесь необходимо провести дальнейшие опыты.

Я полагаю, что для разрешения этой проблемы надо изучить магнитные свойства различных тел при сколь возможно разных значениях температуры, давления и интенсивности магнитного поля. В этой работе я

предполагаю изменять температуру в очень широких пределах; мне удалось исследовать некоторые тела от комнатной температуры и до 1370°.

Из диамагнитных тел я исследовал при разных температурах: воду, каменную соль, хлористый калий, сернокислый калий, азотнокислый калий, кварц, серу, селен, теллур, йод, фосфор, сурьму и висмут; из слабомагнитных тел: кислород, палладий, железный купорос; из ферромагнитных тел: железо, никель, магнитный железняк и чугун.

Мои опыты не обнаружили какого-либо сходства между свойствами диамагнитных тел и свойствами тел парамагнитных, и полученные результаты говорят в пользу тех теорий, которые приписывают магнетизм [[3]] и диамагнетизм причинам разной природы.

Наоборот, свойства ферромагнитных и слабомагнитных тел тесно между собой связаны. При нагревании всякое ферромагнитное тело постепенно превращается в слабомагнитное тело. Можно дать общую картину явления, если заметить, что характер изменения интенсивности намагничения под влиянием изменения температуры и силы намагничивающего поля напоминает характер изменения плотности жидкости под влиянием изменения температуры и давления.

Несмотря на большое число измерений, содержащихся в настоящей работе, ее прежде всего следует рассматривать как исследование общего характера. Все измерения не очень точны; действительно, неточность измеренных значений коэффициента намагничения — порядка 1—2%, даже считая их величинами относительными. Наконец, я мог исследовать достаточно полно магнитные свойства только нескольких тел, изучение же многих других тел едва лишь намечено, и числовые значения, которые я для них определил, должны рассматриваться как результат простой рекогносцировки, предпринятой для выяснения общего характера изменения их магнитных свойств, обусловленных изменением температуры.

Изменение коэффициента намагничения диамагнитных тел с температурой до сих пор не было предметом сколько-нибудь систематического изучения, хотя Плюккер [1] заметил, что при повышении температуры диамагнетизм стеарина, серы и ртути остается неизменным, тогда как диамагнетизм висмута уменьшается.

Соли магнитных веществ были предметом исследования Видеманна, он пришел к важному заключению, что их коэффициент намагничения уменьшается при возрастании температуры и что температурный коэффициент их изменения одинаков для всех магнитных солей. Этот коэффициент по своей абсолютной величине близок к коэффициенту расширения газов. Плесснер повторил работу Видеманна и пришел к тем же заключениям.[2]

---

[1] G. Wiedemann. Lehrbuch der Elektrizität und Magnetismus. Aufl. 3. Braunschweig, 1881—1885.

[2] G. Wiedemann, Pogg. Ann., **126**, 1, 1865; P. Plessner, Wied. Ann., **39**, 336, 1890.

В 1874 г. Роуланд исследовал восприимчивость никеля, кобальта и железа при 0 и 230°. Он показал, что восприимчивость никеля в сильном магнитном поле уменьшается при возрастании температуры и, наоборот, начинает возрастать с температурой, когда поле слабо [4].

В 1880 г. Бауэр и Берсон [3] вновь занялись этим вопросом. Берсон построил кривые интенсивности намагничения никелевого стержня вплоть до температуры 340°, при которой эта интенсивность намагничения падает до очень малых значений.

Ледебур [4] очень изящным методом, основанным на измерении коэффициента самоиндукции катушки, сердечником которой служил железный стержень, исследовал индукцию этого стержня вплоть до температуры магнитного превращения. Он нагревал кусок железа внутри катушки с помощью электрического тока и измерял температуру с помощью термопары Ле-Шателье. Катушка предохранялась от нагревания потоком воды. Мы в нашей работе использовали этот прекрасный способ нагревания и измерения температуры. Электрический ток позволял поддерживать при очень высокой температуре недоступную часть прибора; всякий другой метод не мог бы разрешить подобную задачу.

Гопкинсон провел большую работу по изучению свойств ферромагнитных тел вплоть до температуры их превращения. Он исследовал железо, никель, сталь и целый ряд сплавов железа и никеля, а также железа и марганца. Эти исследования дали неожиданные результаты.[5]

Магнитные свойства железа и никеля Гопкинсон исследовал вплоть до их температуры превращения (около 770° у железа и 340° у никеля); он провел тщательное изучение явлений, и нет никакого смысла повторять подобную работу для этих тел, если только не исследовать их в более широких пределах изменения силы поля и температуры. Гопкинсон пользовался магнитными полями от 2 до 40 единиц; я же смог использовать поля от 25 до 1350 единиц и смог проследить свойства железа за его точкой магнитного превращения вплоть до 1370°; наконец, я попытался детально изучить природу этих явлений при тех температурах, при которых происходит это превращение.

При нагревании железо испытывает еще другие превращения, отмеченные многими наблюдателями. Изучение их очень важно с точки зрения металлургии железа. Наши исследования магнетизма являются дополнительным подтверждением того, что дают другие физические свойства,

---

[3] J. A. Ewing. Magnetic induction of iron. 163, 1890; G. Berson, J. phys., 5, 437, 1886.

[4] P. H. Ledeboer, J. phys., (II), 7, 199, 1888.

[5] J. Hopkinson, Phil. Trans., **180**, 443, 1889 (железо); Proc. Roy. Soc., **44**, 317, 1888 (никель); Proc. Roy. Soc., **45**, 318, 1889; **48**, 442, 1890. — Гопкинсон нашел, что ферроникель, содержащий 25% никеля, слабомагнитен при комнатной температуре; будучи охлажден до —40°, он становится ферромагнитным и сохраняет это свойство при возвращении к комнатной температуре. Чтобы привести ферроникель в первоначальное состояние, его надо нагреть выше 600°.

и это подтверждение особенно убедительно, так как магнитные свойства испытывают особенно сильные возмущения, когда железо претерпевает температурные изменения.[6]

Настоящая работа была выполнена в Школе промышленной физики и химии, где я нашел все, что облегчало ее успешное проведение. Я должен искренно поблагодарить директора Школы г-на Шютцанберже и профессора Домме, в лаборатории которого я работал; я также весьма признателен профессору Бейлю и руководителю работ г-ну Фери, предоставившему мне электромагнит, которым я пользовался в этом исследовании в течение ряда лет.

Методика проведения опытов

Метод измерения. Использованный мною метод в принципе не отличался от тех, которыми пользовались Беккерель [5] и Фарадей [6]. Исследуемое тело помещалось в неоднородное магнитное поле и по закручиванию нити измерялась результирующая сила магнитных действий.

EEEE (рис. 1) изображает горизонтально расположенные плечи электромагнита Фарадея. Оси их образуют между собой некоторый угол. Исследуемое тело помещают в точку O линии Ox, в которой горизонтальная плоскость, проходящая через оси обоих плеч электромагнита (плоскость рис. 1), пересекается с вертикальной плоскостью симметрии. Когда электромагнит возбужден, то действующая сила f направлена вдоль Ox.

Обозначим через H_y силу магнитного поля в точке O. В силу симметрии это поле направлено вдоль Oy перпендикулярно Ox. Пусть I есть *удельная интенсивность намагничения* (т. е. магнитный момент, деленный на массу) и M масса тела, тогда

$$f = MI\frac{dH_y}{dx}.$$

Опыты были предприняты прежде всего для исследования диамагнитных и слабомагнитных тел. Размагничивающая сила, обусловленная на-

---

[6] Исследования Осмонда по превращениям железа и углерода считаются ныне классическими (F. Osmond, Mém. de l'Artil. de Marine, 1888). Этот вопрос был предметом большого числа исследований: G. Gore, Proc. Roy. Soc., 1889 (изменение длины с температурой); W. Barett, Phil. Mag., 46, 473, 1873 (рекалесценция); P. G. Tait, Roy. Soc. Edinb., 27, 125, 1873 (термоэлектрические свойства); J. Pionchon, [Диссертация], Paris, 1886; J. de phys., 3, 269, 1887 (калориметрические измерения); H. Le Chatelier, Bull. Soc. chim, 45, 482, 1886 (термоэлектрические свойства); F. Kohlrausch, Wied. Ann., 33, 1888 (изменения электрического сопротивления); J. Hopkinson, Phil. Trans., 180, 443, 1889 (изменения электрического сопротивления); H. Le Chatelier, J. de phys., 7, 199, 1891 (электрическое сопротивление); E. Ball, Proc. Iron a. Steel Inst., 1890, 1891 (влияние отжига); J. O. Arnold, Proc. Iron a. Steel Inst., may 1894 (микроструктура, скорость охлаждения); G. Charpy, C. r., 117, 850, 1893; 118, 418, 735, 868, 1894 (опыты по растяжению); R. Hadfield, Proc. Iron a. Steel Inst., may 1894.

магничением тела, в этих случаях несущественна, и если через K обозначить *удельный коэффициент намагничения*, то мы имеем

$$I = KH_y$$

и

$$f = MKH_y \frac{dH_y}{dx}.$$

Для того чтобы поместить центр фигуры тела на оси Ox, выбирают такую точку O, в которой произведение $H_y \frac{dH_y}{dx}$ проходит через максимум. Для большинства исследованных тел величина K была действительно постоянной. В таком случае сила f пропорциональна вышеуказанному произведению и имеет максимум в точке O. С практической точки зрения это положение тела обладает многими преимуществами. Действительно, тогда можно брать тела довольно большого объема и смещать их на несколько миллиметров вдоль Ox без того, чтобы действующая сила чувствительно отличалась от той, которая была бы, если бы это тело было сконцентрировано в точке O. Таким образом, можно удовольствоваться приближенной установкой первоначального положения тела вдоль оси Ox. Наконец, пользуясь крутильными весами, без каких-либо неудобств можно позволить телу смещаться вдоль Ox при включении поля. После этого величину смещений можно оценить, не возвращая тело в его исходное положение.

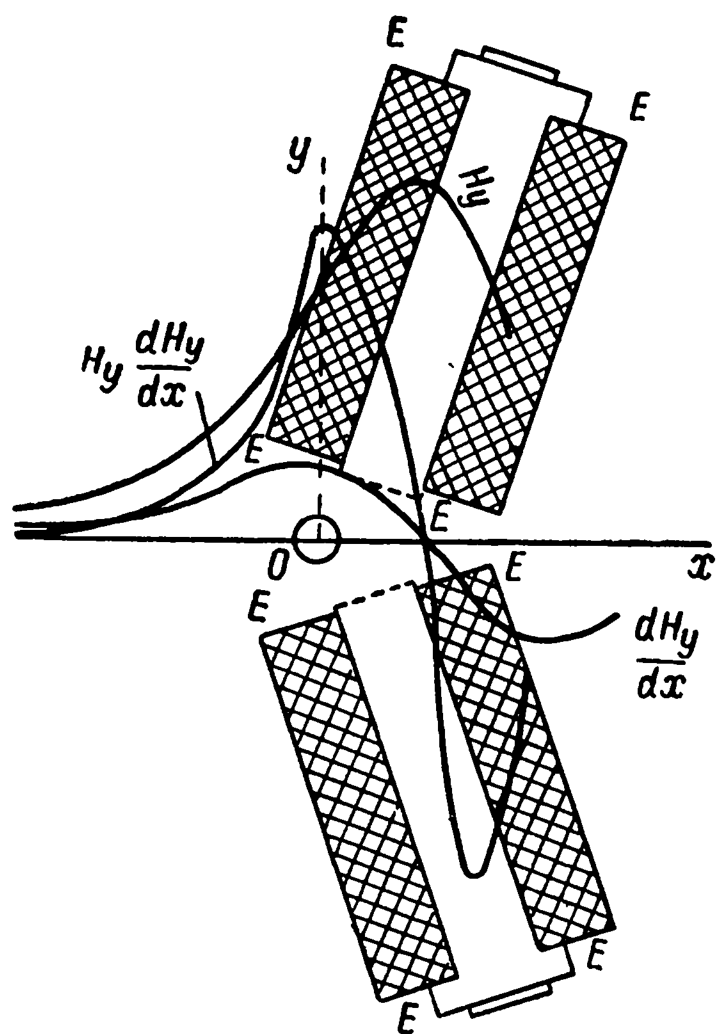


Рис. 1.

Для получения кривых на рис. 1 откладывают в качестве ординат от оси Ox значения величин H_y, $\frac{dH_y}{dx}$ и $H_y \frac{dH_y}{dx}$, соответствующие различным точкам оси Ox. Начинают с того, что строят эти кривые, исходя из предварительного изучения поля, затем, как только точка O выбрана, по измерению магнитного притяжения можно проверить, что сила в этой части поля проходит через максимум.

Чаще всего небольшой кусочек исследуемого тела помещали в стеклянную, фарфоровую или платиновую ампулу; она составляла часть подвижного устройства, подвешенного на нити, закручивание которой использовалось при измерениях. В нашем приборе направление нити пересекало горизонтальную плоскость рис. 1 в точке, расположенной на

прямой Oy, перпендикулярной Ox на расстоянии 5.42 см от точки O. При закручивании нити ампула тогда смещалась вдоль Ox. Используемые смещения всегда были очень малы и никогда не превышали 0.15 см.

Нагревательный прибор. Требовалось измерить силы притяжения и отталкивания, действующие на тела, находящиеся при разных температурах. С этой целью ампула *a* (рис. 2) помещалась в небольшую фарфоровую печь, нагреваемую электрическим током. Такой способ нагревания единственно удобен при трудно доступном положении ампулы, подвешенной на подвижной части крутильных весов между полюсами электромагнита.

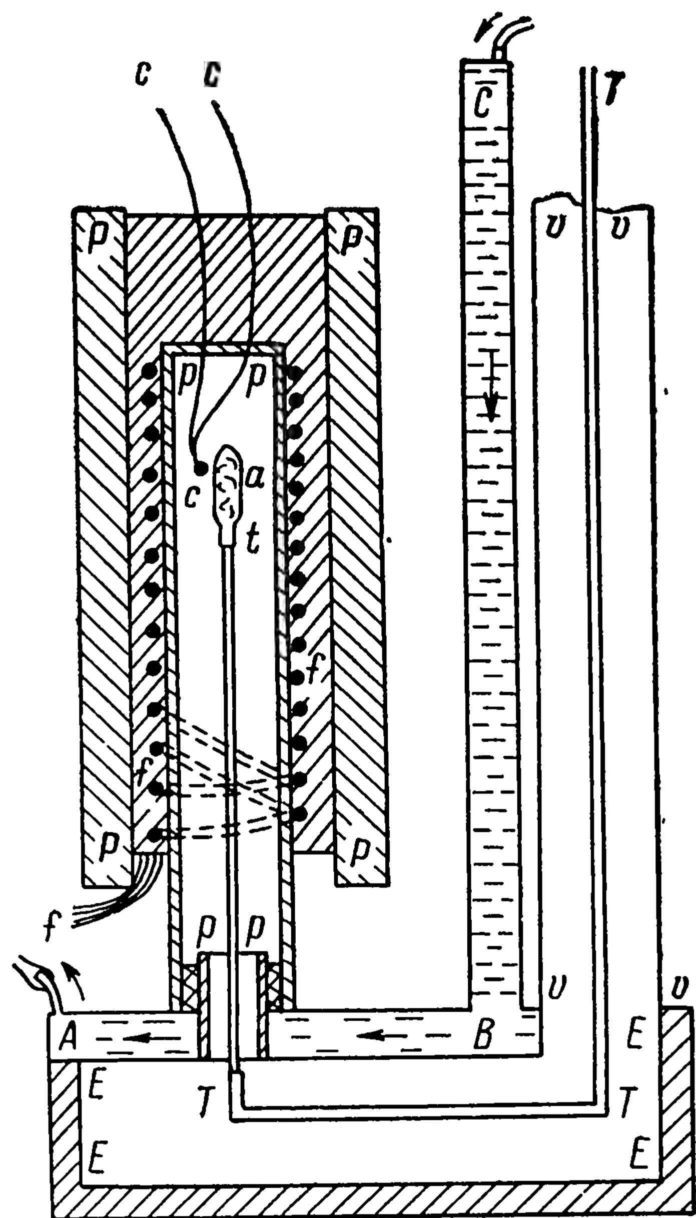


Рис. 2.

a — ампула, содержащая исследуемое тело, *tt* — фарфоровый стержень, поддерживающий ампулу; *TTT* — металлическая трубка, образующая опору и составляющая часть подвижного устройства крутильных весов; *PPPP* и *pppp* — фарфоровая печь; *fff* — платиновая проволока для тока, нагревающего печь; *ccc* — термопара Ле-Шателье; *ABC* — защитный экран с циркулирующей водой; *EEEE* и *vvvv* — деревянный ящик и стеклянная трубка для защиты от воздушных потоков.

Печь представляла собой трубку *pppp* из огнеупорного фарфора, закрытую в ее верхней части. На эту трубку, высотой приблизительно 12 см, наматывали (бифилярно, чтобы устранить всякое магнитное действие) платиновую проволоку диаметром от 0.7 до 0.9 мм и длиной несколько метров. Витки двойной спирали не должны касаться друг друга, и, чтобы надежно сохранять неизменным расстояние между ними, сперва заполняли каолином промежутки между витками, а затем и самые витки покрывали тонким слоем каолиновой пасты; проволоку нагревали током; каолин затвердевал, растрескивался, но не отставал от фарфоровой трубки, и тогда можно было быть уверенным, что проволоки уже больше не будут смещаться. Эту трубку помещали внутрь второй фарфоровой трубки *PPPP* бо́льшего диаметра, а промежуток между обеими трубками заполняли каолиновой пастой или жженой магнезией. Таким путем печь хоть отчасти предохранялась от охлаждения.

Температуру определяли посредством термопары Ле-Шателье *ccc*, спай которой находился на высоте ампулы. В дне трубки *pppp* проделаны два маленьких отверстия, через которые проходят проволочки термопары. Ампула *a* поддерживается стеклянным или фарфоровым стержнем *tt*; этот стержень выходит из печи через отверстие, не касаясь стенок. Стержень *tt* насажен на конец металлической трубки *TTT*, образующей своего рода опору и составляющей часть подвижного устройства крутильных ве-

сов. Нужно, чтобы отверстие, необходимое для вывода стержня, несущего ампулу, находилось в нижней части печи, иначе теплый воздух, как более легкий, будет постоянно выходить наружу и создавать воздушные потоки, которые сделают всякие измерения невозможными.[7]

Во время работы при высокой температуре электромагнит и кожух крутильных весов были защищены от нагревания металлическим экраном с двойными стенками и непрерывной циркуляцией воды ABC.

Деревянный ящик $EEEE$ и трубка vvv защищали стержень TTT от внешних воздушных потоков.

Для получения и поддержания внутри печи, имеющей объем около 14 см^3, температуры 1350°, необходимо около 1500 вт. Температура в печи имеет тенденцию быть более высокой в верхней части; это неудобство частично может быть исключено тем, что платиновую спираль наматывают несколько теснее в нижней части печи.[8]

Печь, достигшую определенного состояния температурного равновесия, можно было держать в этом состоянии сколь угодно долго и при этом в каждой части печи температура оставалась постоянной с точностью до 0.1°. Для этого было достаточно, чтобы наблюдатель действовал реостатом, непрерывно следя за показаниями термопары, присоединенной к достаточно чувствительному гальванометру. Таким путем наблюдателю нетрудно устранять небольшие изменения температуры при первом их появлении. В этом одно из главных преимуществ нагревания электрическим током. Конечно, можно держать температуру постоянной с точностью до 0.1° в каждой части печи, но при этом температура не будет совершенно равномерной по всему объему печи; а когда она очень высока, то вряд ли ее можно знать с точностью, большей, чем 10—20°.

Подвижное устройство (на рис. 3 оно изображено в своем кожухе, электрическая печь удалена). Подвижное устройство прикреплено на крутильной нити FA и в основном состоит из медной рамки $EABC$, которая поддерживает с одного конца ампулу D, а с противоположного — большую вертикальную алюминиевую пластинку P, служащую амортизатором, и стрелку, несущую на своем конце микрометр M. Неподвижный микроскоп, снабженный отсчетной сеткой, наведен на микрометр, смещения которого позволяют оценивать перемещения ампулы. У подвесного крючка A подвижное устройство имеет еще медную горизонтальную полочку π, на которой находятся две медные гирьки; перемещая эти гирьки по полочке, всегда можно добиться равновесия, каков бы ни был вес ампулы.

---

[7] Мы заимствовали у Блондло такое устройство печи с отверстием в нижней части для исключения воздушных потоков (см.: R. Blondlot, J. de phys., 6, 109, 1887).

[8] Можно было бы достичь равномерной температуры, разделив цепь, содержащую платиновую проволоку, на две части; одна часть нагревала бы низ трубки, а другая — верх, и можно было бы, пользуясь отводами на проволоке в верхней части, отрегулировать наилучшее соотношение между силой тока в обеих ветвях.

Часть *AM* рамки расположена в вертикальной плоскости, проходящей через нити и ампулу, след которой проходит вдоль *Oy* (рис. 1). Рамка *ABC* (рис. 3), поддерживающая ампулу, имеет несколько усложненную форму. Это вызвано несколькими причинами: для устойчивости всего подвижного устройства необходимо, чтобы подвесной крючок в *A* находился в более высокой горизонтальной плоскости, чем ампула; кроме того, как мы видели, ампула должна поддерживаться снизу, откуда и получается U-образная форма конца рамки вблизи *C* (рис. 3) или *TTTtt* (рис. 2). Наконец, насколько это только возможно, надо исключить, чтобы опускающаяся часть *BC* рамки (рис. 3) находилась под влиянием магнитных сил, для этого надо намного удалить эту часть от электромагнита. Именно поэтому часть *AB* рамки сперва отходит в горизонтальном направлении от вертикальной плоскости, проходящей через нить и ампулу. Часть *BC* вертикальна, а горизонтальное звено около *C* снова возвращает рамку в указанную вертикальную плоскость; но это звено расположено значительно ниже поля, поэтому электромагнит не оказывает на него сколько-нибудь заметное действие.

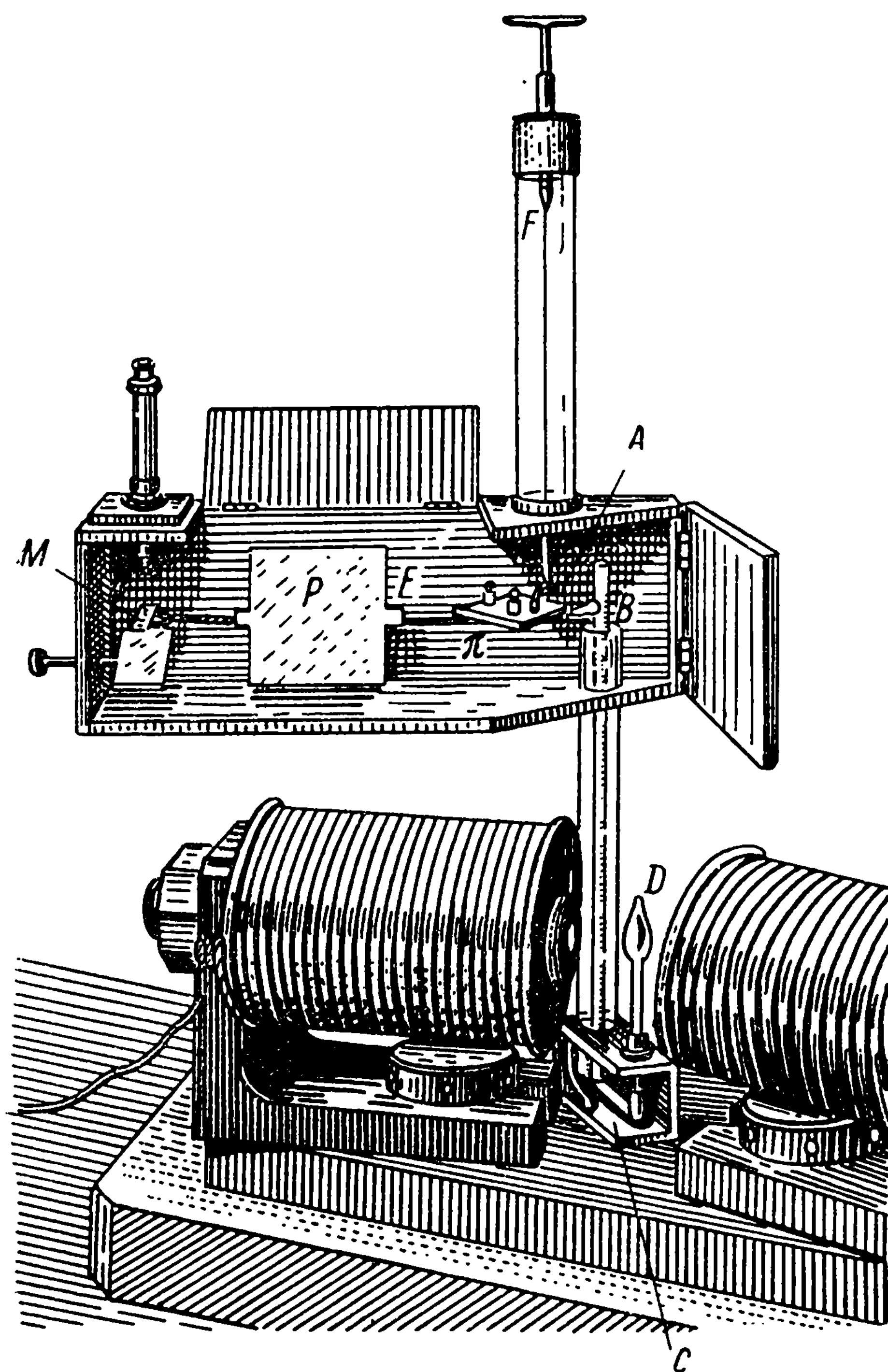


Рис. 3.

Площадь вертикальной алюминиевой пластинки *P* (рис. 3) составляет 40 см², тем не менее на открытом воздухе ее было бы недостаточно для амортизации колебаний; чтобы усилить амортизацию, по обе стороны пластинки на расстоянии нескольких миллиметров от нее помещены две неподвижные алюминиевые пластинки (не представленные на рисунке), параллельные подвижной пластинке и имеющие приблизительно такие же размеры, как она. Когда подвижная пластинка приближается к одной из неподвижных и удаляется от другой, возникающие при этом изменения давления воздуха достаточны для амортизации движения подвеса.

Подвижное устройство полностью и совершенно защищено от потоков воздуха деревянным ящиком, обитым изнутри оловом. Это олово, подвес и все металлические части прибора соединены с землей, чтобы устранить влияния случайных электрических зарядов.

Измерение смещений ампулы. Смещения ампулы определяются посредством микрометра. Расстояние до оси вращения от центра ампулы и от микрометра равны соответственно 5.42 и 24.0 см. Микрометр, изготовленный фотографическим способом, имеет 400 делений; каждому делению соответствует длина 0.00252 см (около $^1/_{40}$ мм). Отсчеты точны и не требуют каких-либо поправок (максимальная ошибка в положении штрихов меньше ошибок отсчета), их удается делать с точностью до $^1/_5$ деления, что соответствует смещению ампулы на 1 μ.

Крутильные нити. При измерениях были использованы три различных нити. Они позволяли изменять пару сил, соответствующую одному делению микрометра в отношении 1 : 3.6 : 42.8. Таким образом, можно было изменять чувствительность в довольно широких пределах, просто заменяя одну нить другой. Нити (1) и (2) были из отожженной платины, а нить (3) — из латуни.

Пары сил на единицу угла определяли динамическим методом, измеряя период колебаний с телами известного момента инерции. Для этого пользовались тремя длинными медными цилиндрами, тщательно обработанными, размер и вес которых были точно определены. При измерении их периода колебаний цилиндры были подвешены точно в середине их длины так, что их оси были строго горизонтальны; легкое зеркальце позволяло пользоваться оптическим отсчетом и работать при очень малых значениях амплитуды колебаний. Цилиндры имели длину 16 см; а массы их были 30, 50 и 100 г. Моменты инерции их равнялись соответственно 30 313, 53 236 и 108 770 единиц CGS. Подвижное устройство нашего прибора имело массу, меняющуюся от 50 до 100 г. Мы отдавали предпочтение результатам, полученным с этими двумя последними значениями массы. Моменты пары сил выражены в единицах CGS [табл. I].

[Таблица I]

Нити	Диаметры, мм	Полезная длина, см	Пары сил для цилиндров, г			f
			30	50	100	
(1)	0.15	22.4	144.0	144.4	144.6	0.00280
(2)	0.20	18.1	529.0	526.6	527.5	0.01022
(3)	0.40	20.2	640.7	618.1	619.0	0.1197

Результаты, полученные с нитями (1) и (2), весьма удовлетворительны; период колебаний не зависел от амплитуды. Опыты с медной нитью (3) большего диаметра давали правильные результаты только тогда, когда колебания были очень малы. При больших амплитудах декремент был больше, чем при малых.

Последний столбец содержит силу в динах (действующую на ампулу), необходимую для отклонения микрометра на одно деление. При хороших

условиях можно было определить силу в пять раз более слабую. При 1300° с нитью (2) можно было еще производить измерения с точностью до одного деления, т. е. можно было еще оценивать силы, действующие на тела, помещенные в печь со столь высокой температурой, с точностью порядка сотых долей миллиграмма. Мы имеем

$$f = \frac{cd}{lL},$$

где c — крутильный момент на единицу угла, d — длина одного деления микрометра (0.00252), l — расстояние от центра ампулы до оси вращения (5.42 см), L — расстояние от микрометра до оси вращения (24.0 см).

Регулировка положения ампулы. В поле выбиралась некоторая определенная точка, с которой должен был совмещаться центр сечения ампулы. Чтобы быстро и уверенно находить положение этой точки, была изготовлена маленькая планшетка, которая легко и точно насаживалась на свободные концы обоих плеч электромагнита; отметка позволяла помещать эту планшетку горизонтально; она тогда располагалась в плоскости рис. 1. В планшетке было прорезано круглое отверстие, диаметр которого был немного больше диаметра ампулы и центр которого находился точно в выбранной нулевой точке.

Выверка прибора не представляла после этого трудностей: удалив печь, перемещали гирьки по платформе подвижного устройства до тех пор, пока ампула не оказывалась в середине отверстия планшетки; при этом подвижное устройство должно было быть совершенно свободным и уравновешенным. После этого убирали планшетку и надвигали печь на ампулу. В предварительных опытах было определено расстояние между нитью подвеса подвижного устройства и другой вертикальной нитью, проходящей через центр отверстия планшетки, установленной на электромагните; это и есть то расстояние $l=5.42$ см, о котором говорилось выше.

Измерение интенсивности магнитного поля. В предварительных опытах интенсивность поля в точке, выбранной для измерения, изучалась в зависимости от силы тока в электромагните, но известно, что при данной силе тока поле не имеет определенного значения, если точно не определен ход изменения силы тока. Поэтому, размагнитив сперва электромагнит, пользуясь для этого методом последовательного перемагничивания с постепенным ослаблением силы тока, стремятся затем изменять силу тока в проволоке циклически и всегда одинаково. Сила тока всегда изменялась постепенно от —8 до +8, и затем от +8 до —8 а. Таким образом, поле определялось силой тока, нужно было только каждый раз указывать, находимся ли мы в периоде нарастания тока или в периоде его спада.

По правде говоря, такой метод, заключающийся в определении интенсивности поля по величине силы тока, протекающего в катушке электромагнита, даже при разумном его использовании уязвим для критики. Для сколько-нибудь точных измерений он был бы неприемлем. В самом деле,

известно, что сотрясения играют некоторую роль при намагничении железа, пока оно не достигло насыщения, и можно с уверенностью утверждать, что при повторении цикла два раза сряду никогда точно не получается того же самого намагничения; однако при измерениях общего характера, когда требуется произвести большое число опытов и когда точность измерения составляет 1—2%, нет никакой опасности в пользовании этим методом, обладающим преимуществом большой практичности. К тому же случайные ошибки, обусловленные сотрясениями, в среднем исчезают, если производить несколько измерений.

Для измерения интенсивности поля мы пользовались методом Вебера: поворачивали на 180° катушку, плоскость витков которой была перпендикулярна полю. Катушка была включена в цепь баллистического гальванометра, с помощью которого определялась сила индуцируемого тока. Мы пользовались выверенным гальванометром Томсона, расположенным далеко от электромагнита.

Катушка состояла из нескольких витков, намотанных на деревянный цилиндр известного диаметра. Среднее сечение витков можно было определить путем расчета. Это сечение имело величину порядка вертикального сечения тех ампул, с которыми мы больше всего работали.

Для градуировки баллистического гальванометра мы использовали известное магнитное поле, создаваемое током известной силы, протекающим по виткам длинного соленоида. В середине соленоида помещалась катушка, состоящая из одного только слоя проволоки, намотанной на деревянный цилиндр. Поток, создаваемый током соленоида в этой катушке известного сечения, служил для градуировки гальванометра. Обе катушки — и та, которая использовалась для поля электромагнита, и та, которая применялась для поля соленоида, — находились постоянно в цепи гальванометра. Наконец, ток в соленоиде измерялся путем определения электродвижущей силы на клеммах эталона в $^1/_{10}$ ома, по которому проходил ток. Для определения этой электродвижущей силы мы пользовались элементом Даниеля. Этот элемент содержал насыщенный раствор медного купороса и раствор цинкового купороса плотностью 1.4. Электродвижущая сила такого элемента при 20° равна 1.09.

Полученные результаты позволили построить кривые и составить числовую таблицу, в которой для каждого значения силы тока i в электромагните дано соответствующее значение поля H. В период нарастания тока и в период его убывания электромагнит был совершенно симметричен с точки зрения направления его намагничения. Вот несколько чисел, взятых из этой таблицы (i выражено в произвольных единицах, H — в единицах CGS) [табл. II].

Ток в цепи электромагнита проходит через реостат, коммутатор и мельхиоровое сопротивление около $^1/_{20}$ ом. Сила тока i дана в делениях отклонения шунтированного гальванометра д'Арсонваля (снабженного стрелкой, подвижным микрометром и неподвижным микроскопом), включен-

[Таблица II]

i	0	20	40	60	80	100	120	143
H при нарастании тока	−20	177.0	376	572	769.0	960	1145	1356
H при спаде тока	+20	217.0	414	607	802.0	990	1160	1356

ного в цепь, точки включения которого были расположены на концах сопротивления в $^1/_{10}$ ома.

Измерения производной поля. Приведенная раньше формула

$$f = KMH_y \frac{dH_y}{dx}$$

показывает, что для того, чтобы можно было определить K надо еще измерить производную $\frac{dH_y}{dx}$ при каждом значении силы тока в цепи электромагнита. С этой целью мы снова помещали катушку в O (рис. 1), причем плоскость витков была перпендикулярна полю; затем эту катушку резко перемещали параллельно самой себе на очень малое расстояние Δx вдоль линии Ox перпендикулярно полю. Поток φ через катушку изменялся на $\Delta\varphi$ и мы имеем

$$\Delta\varphi = s\frac{dH_y}{dx}\Delta x,$$

где s — полное сечение витков. Величину $\Delta\varphi$ измеряли с помощью баллистического гальванометра. Нужно было только переместить катушку на очень небольшое расстояние. Мы пользовались перемещениями от 0.5 до 1.5 мм. Чтобы эти перемещения осуществить быстро, мы пользовались кремальерой грубого движения тубуса микроскопа. Объектив микроскопа был снят, и в подвижную трубку был прилажен деревянный стержень, поддерживающий катушку в том месте поля, которое было желательно исследовать. Для измерения этих перемещений с подвижным тубусом был жестко связан микрометр; он был укреплен сбоку и расположен параллельно тубусу. Неподвижный микроскоп, снабженный отсчетной сеткой и наведенный на этот микрометр, позволял видеть положение микрометра до и после перемещения и получать отсюда величину перемещения с хорошей точностью.

Задача состояла не столько в том, чтобы измерять полный поток через катушку, сколько в измерении небольших изменений этого потока. Для того чтобы получать подходящие для гальванометра импульсы, в качестве катушки нельзя было брать только несколько витков, намотанных

на цилиндр известного диаметра; надо было брать настоящую катушку с большим числом витков.

Действуя так, как мы только что указали, мы все еще получали результаты, не вполне удовлетворительные; новая катушка действительно оказалась очень чувствительной к случайным изменениям потока. В этих опытах небольшие случайные толчки постоянно вызывали очень небольшие изменения интенсивности поля, а это приводило к изменениям потока, проявляющимся в непрерывных и беспорядочных смещениях показаний гальванометра. Для измерения производной поля более предпочтительно применять несколько иной метод. В каждой точке магнитного поля имеет место соотношение

$$\frac{dH_y}{dx} = \frac{dH_x}{dy}.$$

Мы получим то же самое, если будем измерять вторую из этих величин. Для этого надо поместить катушку в точку O (рис. 1), но плоскость витков должна быть при этом параллельна полю и перпендикулярна направлению Ox. Перемещение должно происходить вдоль направления поля Oy. Тогда для изменения потока $\Delta\varphi'$ имеем

$$\Delta\varphi' = s\,\frac{dH_x}{dy}\,\Delta y.$$

Здесь $\Delta\varphi'$ есть то же, что и $\Delta\varphi$ для перемещения Δy, равного Δx; но φ' в среднем равно нулю, так как у катушки в ее среднем положении ее витки параллельны полю. Изменения потока, обусловленные сотрясениями, уже больше не ощущаются, и мы получаем ту же чувствительность при значительно большей устойчивости показаний гальванометра. Опыт показал, что эти два метода определения производной дают почти одинаковые средние результаты, но измерения, проведенные вторым методом, давали лучшее согласие между собой, чем по первому.

Перемещение Δy в этом втором методе производилось и измерялось таким же способом, как и в первом, но только деревянный стержень, поддерживающий катушку, изогнут под прямым углом, так как наличие двух ветвей электромагнита не позволяло располагать подвижной тубус в направлении перемещения вдоль продолжения Oy. Тубус, однако, перемещался параллельно Oy на некотором расстоянии от электромагнита, и катушка, укрепленная на изогнутом деревянном стержне, перемещалась вдоль Oy.

Таким путем мы могли определять точки кривой $\frac{dH_y}{dx}$ (рис. 1), хотя этой кривой мы не пользовались при окончательных измерениях; то, что нужно знать — это величину производной в точке O для разных значений силы тока в электромагните. Вместо того чтобы повторять абсолютные измерения, представлялось более предпочтительным определять отноше-

ние производной поля к самому значению поля для одного и того же значения силы тока.

С этой целью в цепь гальванометра всегда была включена катушка, которая служила для определения производной, и катушка, которая служила для определения силы поля, соединенные параллельно. Сначала производили полную серию измерений поля при разных значениях силы тока, затем, заменяя катушки одна другой, проводили измерения, касающиеся производной. Наконец, возвращая первую катушку на место, вновь производили серию измерений, подобную первой.

Пусть δ будет отклонение, когда вносят в поле катушку, служащую для определения поля, и пусть s — площадь этой катушки; пусть δ' — отклонение, получаемое с катушкой для определения производной, имеющей площадь S; для перемещения l при том же состоянии поля мы имеем

$$\frac{\text{Производная}}{\text{Поле}} = \frac{\delta'}{\delta} \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{2s}{S}.$$

Мы нашли, что для полей, изменяющихся от 150 до 1350 единиц, отношение производной к полю, как в период нарастания, так и в период уменьшения тока в электромагните, было почти постоянным, и было равно 0.188. Отклонения от среднего в ту и другую сторону были нерегулярны и меньше 1.5%. Железо магнита было далеко от насыщения.

Для полей слабее 100 единиц измерения производной становились менее точными: но мы приняли несколько произвольно, что в этих полях отношение производной к самому полю остается еще точно таким же. Мы видели, что поле изменяется на $1/_{5.32}$ своей величины на 1 см смещения в направлении Ox. Такой слабый спад поля был взят умышленно, несмотря на очень серьезное неудобство, обусловленное необходимостью измерять очень слабые силы. Но это компенсируется тем, что тогда получается большее пространство для регулировки положения ампулы, и, наконец, когда ампула не слишком велика, можно допустить, что с точки зрения интенсивности магнитного поля все тело находится приблизительно при одних и тех же условиях во всех своих частях.

Измерение полной площади витков катушки. Необходимо знать полную площадь витков катушки, которая служила для определения производной поля. Абсолютно невозможно определить эту площадь путем измерения геометрических размеров витков, ибо маленькая катушка целиком заполнена проволокой. Для того чтобы определить полную площадь витков, ее сравнивают электрическим методом с известной площадью какой-нибудь другой катушки.

Катушка A известной площади состоит из одного только слоя проволоки, намотанной на цилиндрическую трубку известного диаметра, превосходящего наружный диаметр катушки B, площадь которой хотят определить. Обе катушки укрепляют одну против другой или одну в другой так, чтобы их витки были параллельны, а их оси совпадали. Затем доби-

ваются взаимного уничтожения индукционных действий, вызванных появлением однородного магнитного поля, перпендикулярного виткам обеих катушек.

С этой целью катушки были включены параллельно в цепь баллистического гальванометра таким образом, чтобы индукционные токи противодействовали друг другу при возникновении поля. Чтобы получить однородное магнитное поле, мы использовали центральную часть внутри длинного соленоида, по которому можно было пропускать сильный ток. Чтобы привести обе катушки почти к полной взаимной компенсации, мы изменяли число витков в катушке A.

Таким путем достигали положения, когда при n витках гальванометр отклоняется в одном направлении, а при $(n+1)$ витках — в другом. Из пропорции, составленной из отклонений, полученных в обоих случаях, вычисляли ту дробную часть витка, которую надо было прибавить к n виткам катушки A для получения точной компенсации; другими словами, для того, чтобы обе катушки обладали одинаковыми площадями.[9]

Этот электрический метод сравнения площадей двух катушек дает прекрасные результаты, и, я думаю, что он мог бы быть использован в других случаях, даже при точных измерениях.

Числовые данные, относящиеся к катушкам и к баллистическому гальванометру. Катушка A, которая служила для определения поля, состояла из восьми витков диаметром 2 см, что давало полную площадь 25.13 см^2. Катушка B, помещенная в соленоид и предназначенная для градуировки гальванометра, имела 87 витков, 3.54 см в диаметре и полную площадь 856.4 см^2. Соленоид для эталонирования поля, в которое мы помещали катушку B, имел длину 49.2 см, число витков на 1 см длины — 4.940, диаметр витков — 6.8 см. Отсюда, учитывая, что соленоид не был бесконечно длинным, поле в центре соленоида было равно 6.148 для тока в 1 а, протекающего по проволоке, и поток в катушке B при токе в 1 а в соленоиде был равен 5264.

Баллистическим гальванометром служил гальванометр Томсона с малым внутренним сопротивлением; инерция стрелки была увеличена добавлением дополнительной массы, чтобы колебания сделать достаточно медленными. Катушки A и B были включены последовательно в цепь гальванометра и было найдено, что для отклонения отсчета по шкале гальванометра на 1 см требуется изменение потока на 2448 единиц. При отклонении свыше 15 см уже не было больше пропорциональности между потоком и отклонениями (отклонения тогда растут быстрее, чем поток).

Катушка C для измерения производной поля была сравнена с другой, как мы объяснили выше; ее площадь оказалась эквивалентной площади

[9] Во всех опытах с индукцией провода, связывающие катушки с гальванометром, или между собой, всегда были хорошо изолированными, двойными и скрученными друг с другом, таким образом, чтобы никакие другие индукционные действия, кроме тех, которые возникают в катушках, не имели бы места.

55.6 витков катушки, состоящей из одного слоя проволоки, каждый виток которой имеет диаметр 2.51 см. Площадь этой катушки C, согласно этому сравнению, была равна 276 см^2.

Термопара Ле-Шателье. Для построения кривой этого прекрасного прибора мы основывались на следующих данных:

		°C
Сравнение со стеклянными ртутными термометрами Бодэна и Делонэ	до	300
Кипение серы		445
Плавление хлористого натрия		780
» серебра		960
» золота		1052
» палладия		1500 (Виолль)

Виолль нашел для точек плавления серебра и золота 954 и 1035°. Хольборн и Вин давали для тех же тел 968 и 1070°. Мы приняли для серебра и золота среднее из результатов, полученных в этих двух работах.[10]

С этой термопарой мы определили несколько точек плавления:

	°C
Чистая продажная сурьма	622 [11]
Кристаллический магнетит (Fe_3O_4)	1377
Мягкое железо	1460
Никель	1460
Спай термопары	1690

Гальванометр Д'Арсонваля, употреблявшийся с термопарой, был изготовлен с несколько более тонкой проволокой, чем обычно, и в его цепь было введено последовательно сопротивление для уменьшения отклонений. Когда не требовалось больше измерять температуру, а лишь регулировать ее постоянство, это сопротивление устранялось для достижения большей чувствительности.

Проведение опытов. Итак предварительными опытами было определено:

1) сила, необходимая для того, чтобы вызвать отклонение микрометра для каждой из крутильных нитей;

2) величина силы поля для каждого значения силы тока, проходящего через катушки электромагнита в период нарастания и в период уменьшения тока;

3) отношение производной поля к величине самого поля;

4) кривая термопары Ле-Шателье, показывающая температуру.

Когда мы приступали к определению магнитных свойств тела, надо было прежде всего отрегулировать положение ампулы и установить печь.

---

[10] J. Violle, C. r., 89, 702, 1879; L. Holborn, W. Wien, Wied. Ann., 47, 187, 1892.

[11] Во всех справочниках дается значительно менее высокая температура.

Затем осуществляли вхолостую несколько полных циклов электромагнита, чтобы перед началом отсчетов он всегда был в одном и том же состоянии.

Наконец, мы наблюдали при комнатной температуре отклонения микрометра, соответствующие различным значениям силы тока, постоянно заставляя электромагнит совершать циклы намагничения и делая только один или два отсчета на каждый цикл. Такой порядок действия позволил избежать ту ошибку, которая происходит от смещения нуля крутильных весов, и позволил поддерживать электромагнит всегда в одном и том же состоянии. После этого мы изменяли температуру, пропуская ток через печь, и снова наблюдали отклонения, когда температура в течение 20—30 мин. сохранялась неизменной.

Температурное равновесие, по-видимому, устанавливалось при одинаковых изменениях температуры тем быстрее, чем более нагрета была печь. Вероятно, фарфор становился более теплопроводен при высоких температурах.

Когда полная серия заканчивалась, мы опорожняли ампулу, содержащую исследуемое тело, и затем с пустой ампулой повторяли все то, что было произведено с заполненной ампулой, с тем чтобы ввести поправки на результаты действия магнитного поля на ампулу и на ее держатель.

Эта утомительная операция определения поправок почти удваивала работу, необходимую для проведения одной серии измерений. Но зато она, может быть, исключала некоторые небольшие систематические ошибки, которые могут возникать в результате нагревания печи и которые повторяются совершенно одинаковым образом при двух последовательных нагреваниях.

Абсолютные определения. Опыты не были поставлены специально с целью проведения хороших абсолютных измерений; я думаю, что с этой точки зрения все определения содержат ошибки в 3 или 4%.

Так как, однако, до сих пор еще не было сделано точных определений коэффициента намагничения, то найденные мною числа представляют определенный интерес.

Те ошибки, которые больше всего отягощали абсолютные измерения в моих опытах, я думаю, были следующие: это прежде всего неопределенность положения ампулы и соответствующая ей неопределенность величины плеча рычага, затем неопределенность относительного положения катушки, служащей для измерения поля, и катушки, которая позволяла измерять производную; не было уверенности, что эти измерения сделаны достаточно точно для одной и той же области поля. Наконец, некоторая общая неопределенность происходила из-за очень большого числа измерений ограниченной точности, которые непосредственно влияют на окончательные результаты.

Относительные определения. Неточность относительных значений при сравнении коэффициента намагничения двух различных тел составляла

от 1 до 2%; главнейший источник ошибок происходил, вероятно, из-за небольших различий в установке положения ампулы, которые обусловливали изменения соответствующей им средней величины плеча рычага.

Неточность относительных значений при сравнении чисел серий измерений, проведенных при различных температурах, без нарушения положения ампулы, была вообще меньше 1%, если условия измерения были достаточно хороши. Однако расчет поправки на ампулу часто снижает точность окончательных результатов. Часто также определение температуры не было достаточно точным.

Предварительные измерения проводились только один раз в начале опытов. Имелись опасения, не будет ли прибор испытывать какие-нибудь расстройства регулировки, не будут ли происходить изменения чувствительности гальванометра, не будет ли температура несколько изменять состояние электромагнита. Чтобы устранить все эти причины беспокойства, с самого начала было проведено измерение с ампулой, наполненной водой, которую затем сохраняли на все время исследования. Повторяя достаточно часто это измерение и сравнивая его с первым, можно было определять поправочный множитель к измерениям, проводимым с прочими телами. Такая предосторожность не была бесполезной: в ходе этих экспериментов, которые продолжались в течение нескольких лет, поправочный множитель иногда превышал 3%; кроме того, нужно было заботиться, чтобы все измерения проводились при температурах, не отклоняющихся более чем на 4° от средней, за которую была принята температура 20°.

Все измерения могут быть рассматриваемы как относительные по отношению к воде, для которой значение удельного коэффициента намагничения было принято равным $0.79 \cdot 10^{-6}$.

Поправки, обусловленные магнетизмом окружающего воздуха. Мы провели исследование свойств кислорода при разных температурах, что позволило нам точно оценить эти поправки для всех температур; мы скажем о них, когда будем говорить о кислороде.

Чистота исследованных тел. Магнитные свойства железа столь сильны по сравнению с магнитными свойствами диамагнитных тел, что, проводя опыты с последними, надо стремиться, насколько только это возможно, чтобы они были свободны от железа; и все же можно опасаться, что достаточная чистота их не будет достигнута. Иногда, однако, это не представляло непреодолимых препятствий: это происходит оттого, что железо в соединениях обычно в значительной степени теряет свои исключительно сильные магнитные свойства. В таких случаях достаточно иметь лишь относительную чистоту (например, такую, которая бывает, когда, пользуясь обычными аналитическими методами, обнаруживают только следы железа). Наоборот, уже лишь незначительное количество железа может существенно изменить магнитные свойства, если оно находится в металлическом состоянии или в виде окисла или сернистого соединения. В таком случае его присутствие заметно сказывается в явлении гистерезиса или

в крайнем случае в том, что оно обусловливает сложный ход кривой зависимости намагничения I от силы поля H. Наоборот, у всех чистых слабомагнитных тел $I=f(H)$ есть прямая, проходящая через начало координат.

Я проделал несколько опытов с белым воском, в который я вносил некоторое известное количество металлического железа в виде пудры. Вот те заключения, которые можно было вывести из этих опытов, если предположить, что мы имели дело с телом, обладающим диамагнитными свойствами воды: $^1/_{100\,000}$ железной пудры (по весу) в среднем уничтожает диамагнетизм, но вызывает чрезвычайно сильные гистерезисные явления; $^1/_{200\,000}$ железа уменьшает диамагнетизм наполовину, но вызывает еще очень сильные явления гистерезиса; $^1/_{1\,000\,000}$ доля железа создает в среднем при определении величины K ошибку в $^1/_{10}$, явления гистерезиса более не ощущаются, но кривая $I=f(H)$ еще заметно искривлена и обращена выпуклостью в сторону оси H.

Явления гистерезиса обычно обнаруживаются только в слабых полях. Однако явления этого рода имеют место и при сильных полях в некоторых других телах, содержащих железную пудру. Это происходит потому, что намагничивающее поле внутри крупинок железа в действительности очень мало из-за размагничивающего поля, обусловленного намагничением.

Пыль, имеющаяся в лабораторных комнатах, содержит железо, но она производит действие, отличное от того, что дает порошок чистого железа. Я полагаю, что это действие вызывается окисью железа и выражается в том, что прямая $I=f(H)$, соответствующая чистому слабомагнитному телу, перемещается так, что она уже больше не проходит через начало координат.

Диамагнитные тела

Мы изучали эти тела, помещая их в стеклянные, обычно достаточно объемистые ампулы (несколько кубических сантиметров), так как подлежащие измерению величины были очень малы. Действительно, коэффициенты намагничения диамагнитных тел по абсолютной величине гораздо меньше, чем тел слабомагнитных. Мы работали с печью из стойкого стекла, превышающей своими размерами фарфоровую печь. Температура при этом не превышала 460°. Для работы при более высоких температурах надо было помещать тела в платиновые или фарфоровые ампулы; но тогда поправки па ампулу оказывались значительно больше измеряемой величины.

Мы исследовали воду, каменную соль, хлористый калий, сернокислый калий, азотнокислый калий, кварц, серу, селен, теллур, бром, йод, фосфор, сурьму и висмут. Это последнее вещество было предметом особенно длительного изучения.

У всех этих тел коэффициент намагничения оказался постоянным, каково бы ни было поле в пределах изменения от 50 до 1350 единиц.

Наконец, ни одно из них не обнаруживало явлений остаточного магнетизма. За исключением одного или двух частных случаев, о которых мы скажем позже, мы получали для зависимости $I=f(H)$ прямую линию. Точки, полученные из опыта, обнаруживали беспорядочные отклонения от этой прямой, редко превышавшие 1%. Мы не будем в дальнейшем больше говорить об этих проверках, укажем только раз и навсегда, что их проводили с каждым исследуемым веществом и при каждой температуре. Мы не будем также больше упоминать о поправках на кислород воздуха, которые каждый раз вводились.

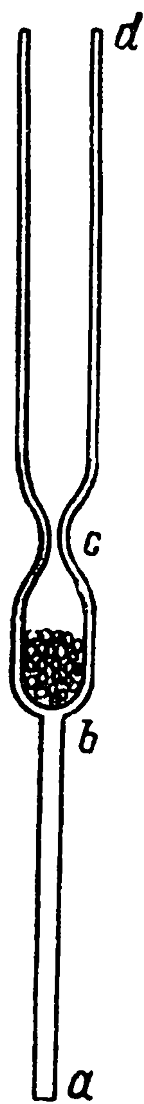


Рис. 4.

Для ампул мы брали запаянную с одного конца трубку диаметром от 1 до 2 см; к запаянному концу припаивали стеклянную палочку *ab* (рис. 4). Эта палочка предназначалась для укрепления ампулы в печи. На расстоянии 2—3 см от дна в точке *c* трубку несколько сужали, не запаивая ее полностью, после чего в нее вводили изучаемое вещество.

Когда предполагали работать в воздухе, то трубку перерезали в точке *c*; при этом надо было знать плотность вещества, чтобы внести поправку на присутствие воздуха. Если же предполагалось работать с закрытой ампулой, то сперва сильно сужали трубку в точке *c*, затем откачивали воздух и запаивали ампулу в точке *c*. По окончании измерений с веществом проводили новую серию с открытой ампулой, содержащей воздух. Чтобы определить влияние воздуха, то в том случае, когда сначала производилась откачка ампулы, надо было знать ее внутренний объем. Этот объем определялся либо непосредственно по взвешиванию воды, наполняющей ампулу, либо косвенно по измерению внешнего объема закрытой ампулы и вычитанию из него объема стекла.

При запаивании ампулы из нее надо было откачивать воздух, так как иначе нельзя было знать, сколько воздуха оставалось в ампуле в момент ее запаивания, ибо в этот момент ампула нагревается и поправка становится неопределенной.

Вода. Многократно продистиллированную воду вводили в стеклянные ампулы, заканчивающиеся тонким острым запаянным оттянутым концом. После измерения этот конец отламывали и воду выпаривали, помещая ампулу в сушильный шкаф с температурой, несколько превышающей 110°. Водяной пар медленно выходил через оттянутый конец, так что опоражнивание ампулы продолжалось несколько часов. При таких условиях можно было надеяться, что вся пыль и другие возможные загрязнения, содержавшиеся в воде, останутся в ампуле.

После этого ампулу опять помещали в прибор для того, чтобы определить поправку, обусловленную нахождением ампулы в поле. Получен-

ные результаты затем исправлялись за счет влияния воздуха; в опытах при комнатной температуре эта поправка достигала приблизительно 4% измеряемой величины.

Пять измерений, проведенных при комнатной температуре с разными ампулами, дали для $(-K \cdot 10^6)$ значения 0.790, 0.798, 0.786, 0.795 и 0.770, среднее из которых равно 0.788 [7].

Мы примем для воды $(-K \cdot 10^6)=0.79$, и это значение будем принимать за исходное во всех других измерениях.

Квинке нашел для воды $(-K \cdot 10^6)=0.815$ (вычислено Дюбуа).

Дюбуа[12] нашел, пользуясь методом Квинке, $(-K \cdot 10^6)=0.837$. Для определения влияния изменения температуры мы провели сперва серию опытов с водой в ампуле из тонкого стекла.

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
До нагревания	20	0.775
» »	103	0.785
После нагревания	20	0.788

Вторая серия была проведена при более высокой температуре в более толстой ампуле, способной выдержать большое давление. К сожалению, поправка на ампулу становится в этом случае довольно значительной.

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
До нагревания	21.0	0.758
» »	115.0	0.789
» »	189.0	0.845
После нагревания	20.7	0.860

Мы видим, что значения, полученные при нагревании, лежат между теми, которые получены при комнатной температуре до и после нагревания. Отсюда надо заключить, что коэффициент намагничения воды не изменяется заметным образом. Числа первой серии мало изменяются, однако в обеих этих сериях замечается, что значения K всегда возрастают после начала каждого эксперимента. Это особенно заметно проявляется во второй серии. Я думаю, что это вызвано все возрастающим влиянием стекла. Измерения, предпринятые для определения поправки на ампулу при разных температурах, проводились после выпаривания воды в сушильном шкафу; следовательно, эта поправка должна относиться только к последним опытам каждой серии; в начале серии ампула была в другом состоянии. Сравнением, наиболее заслуживающим доверия, будет сравнение последнего числа для нагретого состояния со значением для холодного состояния после охлаждения. Числа же обеих серий, сравниваемые таким образом, очень близки.

Я считаю возможным заключить, что изменение коэффициента намагничения с температурой очень слабое и, вероятно, меньше 1.5% между 20 и 199°.

[12] H. Du Bois, Wied. Ann., 35, 137, 1888.

Каменная соль. Мы работали с открытой ампулой, содержащей каменную соль в виде мелких кусочков. Было найдено, что при 20° $(-K \cdot 10^6) = 0.573$; серия измерений, проведенных с целью определения влияния температуры, дала:

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
До нагревания	16.5	0.575
» »	240.0	0.578
» »	455.0	0.586
После нагревания	16.1	0.580

Отсюда надо заключить, что между 16.5 и 455° коэффициент намагничения остается постоянным. Как будто имеется слабое указание на некоторое увеличение величины K на 1%, но опыты не были достаточно точны, чтобы можно было утверждать о наличии столь слабого изменения.

Для введения поправки на влияние воздуха принималось, что плотность соли равна 2.10.

Хлористый калий. Вероятно, присутствовали некоторые следы порошка окиси железа, так как зависимость $I=f(H)$ при низких температурах представлялась прямой линией, не проходящей через начало координат. В нагретом состоянии, напротив, $I=f(H)$ давало прямую, проходящую через начало.

$t°$	$-K \cdot 10^6$
17.9	0.550
240.0	0.562
465.0	0.564

Отсюда можно заключить, что K не изменяется заметным образом. Для поправки на влияние воздуха плотность принималась равной 1.98.

Азотнокислый калий.

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
До нагревания	18.0	0.329
» »	230.0	0.330
» »	420.0	0.331
После нагревания	18.0	0.335

Коэффициент намагничения остается неизменным между 18 и 420°. Это весьма замечательно, ибо при 350° азотнокислый калий плавится, и, следя за возможными отклонениями этого коэффициента, при постепенном повышении температуры, находим, что никаких резких изменений его не проявляется. Итак, коэффициент намагничения не зависит от физического состояния. Для поправки на влияние воздуха плотность принималась равной 2.10.

Сернокислый калий. По случайным обстоятельствам нам не удалось повторить измерение при комнатной температуре после нагревания, что, конечно, было бы полезной проверкой. Из приводимой серии измерений следует заключить, что коэффициент K почти постоянен.

$t°$	$-K \cdot 10^6$
17	0.430
260	0.431
460	0.446

Для введения поправки на воздух плотность принята равной 2.60.

Кварц (кристалл с Изеры). Гексагональная призма, хорошо оформленная, удлиненная в направлении оптической оси. Кристалл укреплялся на конце стеклянного стержня в особой стеклянной чашечке.

Для целого кристалла, поставленного вертикально, перпендикулярно магнитному полю, было получено $(-K \cdot 10^6)=0.443$.

Этот кристалл был слишком длинен, чтобы ему можно было дать какое-нибудь другое положение.

Для кристалла, подходящим образом разрезанного, было найдено:

	$-K \cdot 10^6$
Оптическая ось перпендикулярна полю и вертикальна	0.439
Оптическая ось перпендикулярна полю и горизонтальна	0.444
Оптическая ось параллельна полю	0.437

Различия между этими числами имеют порядок ошибок установки; мы примем, что коэффициент намагничения почти одинаков во всех этих направлениях и равен $(-K \cdot 10^6)=0.441$.

Влияние изменения температуры. Оптическая ось вертикальна и перпендикулярна полю:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
22.3	0.443
210.0	0.446
430.0	0.449

Влияние изменения температуры. Оптическая ось параллельна полю:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
17	0.438
405	0.446

По-видимому, имеется небольшое увеличение значения K при повышении температуры, но оно настолько слабо, что в пределах точности опытов коэффициент намагничения надо считать неизменным.

Для внесения поправки на влияние воздуха плотность принимали равной 2.65.

Тумлирц [13] нашел, что у кварца заметным образом проявляются свойства остаточного магнетизма.

Мы не наблюдали ничего подобного: наши опыты показали только, что остаточное намагничение по абсолютной величине меньше $^1/_{500}$ намагни-

[13] O. Tumlirz, Wied. Ann., 27, 33, 1886; Wien. Akad., 93, 1886.

чения, вызываемого полем в 1350 единиц. Наши опыты не были приспособлены для того, чтобы обнаруживать очень слабые проявления остаточного магнетизма.

Сера. Аллотропическое состояние, по-видимому, заметного влияния не оказывает. По крайней мере оно не вызывает разности, достигающей 1%.

Октаэдрическая сера при низких температурах непосредственно после плавления дает для коэффициента намагничения то же самое значение, которое она имела до нагревания; она при этом должна превращаться в призматическую серу.

Общее значение: $(-K \cdot 10^6) = 0.51$.

Серный цвет (промытый в сероуглероде и в соляной кислоте) дает значительно отличающееся число 0.55, но после плавления мы вновь получали то же самое значение; это ясно показывает, что нерастворимая сера имеет тот же коэффициент, что и другие аллотропические модификации; только измерение ее было мало точным, так как приходилось иметь дело с очень малым количеством вещества.

Влияние температуры, 1-я серия:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
19	0.507
100	0.514
125	0.517

Октаэдрическая сера, хотя и оставалась достаточно долго при постоянной температуре 125°, не была еще полностью расплавлена. Ее расплавили на лампе и затем провели новую серию:

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
	19	0.507
Плавленная при	142	0.530
» »	225	0.512

Таким образом, коэффициент намагничения значительно не изменяется в результате плавления и различных превращений, происходящих между 19 и 225°. Может быть, после плавления при 142° и имеется кратковременное увеличение, исчезающее при 225°. Эти опыты были недостаточно точны и недостаточно многочисленны, чтобы можно было утверждать существование столь слабого изменения.

Черный стекловидный селен (продажный). При реакции с роданистым калием в этом образце были обнаружены следы железа. При разных температурах мы имели:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
19	0.320
89	0.320
160	0.321
240	0.307
340	0.308
415	0.305
19	0.321

Как будто имеется небольшое понижение примерно на 4% между 160 и 240°. Это снижение соответствует плавлению, имеющему место около 240°.

Была бы желательна новая серия измерений, чтобы исключить сомнения в этом вопросе.

Теллур. Образец содержал следы железа. Было найдено:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
20.6	0.311
157.0	0.311
305.0	0.310

Коэффициент остается неизменным между 21° и 305°.

Эттингсхаузен[14] нашел для объемного коэффициента намагничения x теллура при комнатной температуре значение $(-x \cdot 10^6) = 1.60$. Образец теллура имел плотность 6.16. Это дает для удельного коэффициента намагничения

$$(-K \cdot 10^6) = 0.242,$$

т. е. число, которое на 22% ниже того, что было найдено мною.

Опыты г-на Эттингсхаузена и мои с висмутом были, напротив, в согласии, как это мы увидим дальше.

Бром. Была проведена только одна серия измерений при комнатной температуре. Она дала

$$(-K \cdot 10^6) = 0.410.$$

Для определения поправки на влияние ампулы мы очень медленно испаряли бром в термостате; в ампуле оставалось кое-какое загрязнение, хотя и очень слабое, но обладающее магнитными свойствами; однако, анализируя его, мы не смогли найти в нем железа.

(Выпаривая в большой ампуле, как и раньше, 30 г брома, мы обнаружили только немного бромистого калия и следы сернокислого калия).

Йод, подвергнутый несколько раз возгонке. Медленно испаряемый в термостате йод даже после этого сохранял еще едва заметные следы загрязнения, производившие слабое магнитное действие.

$t°$	$-K \cdot 10^6$
18	0.385
107	0.380
164	0.389
18	0.385

Коэффициент намагничения остается неизменным даже во время плавления, которое имеет место при 104°.

Ртуть. Незавершенные опыты проводились с совершенно чистым образцом. Я не могу привести цифры, но могу утверждать, что между 20 и 300° коэффициент намагничения не изменяется заметным образом.

[14] A. Ettingshausen, Beibl. zu Ann. der Phys. u. Chem., 280, 1888.

Фосфор. Расплавленный фосфор вводили под водой в ампулу, снабженную отростком *cd* (рис. 4). Затем большую часть воды выпаривали, а последние остатки ее удалялись при откачке. Ампулу запаивали с высушенным в пустоте фосфором.

Были получены следующие значения:

$t°$	$-K \cdot 10^6$
20	0.918
40	0.914
70.5	0.928
20	0.928

Как видим, коэффициент намагничивания остается неизменным, когда температура повышается от 20 до 70°. В момент плавления при 44° не происходит никаких изменений.

После этого ампулу, наполненную фосфором, прогревали при 270° в течение 240 час. При этой операции белый фосфор частично превращался в красный. Ампулу переносили в магнитную установку. Для коэффициента намагничения K' смеси красного и белого фосфора мы получили следующие значения:

$t°$	$-K' \cdot 10^6$
17	0.789
275	0.800
17	0.795

Величина K' не зависит от температуры.

После этого ампула была разбита и белый фосфор извлечен с помощью сероуглерода. Было найдено, что 0.68 первоначального веса белого фосфора превратилось в красный фосфор.

Обозначая через K_1 коэффициент намагничения красного фосфора, будем иметь между 20 и 275°

$$K_1 = \frac{K' - 0.32K}{0.68},$$

откуда для красного фосфора

$$-K \cdot 10^6 = 0.73.$$

Это число меньше 0.92, найденного для белого фосфора. Разность составляет 20%. К сожалению, чтобы извлечь красный фосфор, пришлось разбить ампулу на мелкие кусочки. Поправку пришлось определить с другой ампулой, почти такой же, как первая, но не вполне одинаковой с ней. В результате получилась некоторая неточность числового значения коэффициентов намагничения двух модификаций фосфора. Наконец, следует соблюдать осторожность в тех случаях, когда числовые данные получаются только из одного опыта, особенно когда этот опыт длителен

и сложен. Однако, как мы думаем, можно утверждать, что коэффициент намагничения красного фосфора меньше, чем белого, и что ни тот, ни другой из коэффициентов не меняются с температурой.

Сурьма. Чистая продажная сурьма содержит весьма заметные количества железа. Для наших измерений был использован образец сурьмы, приготовленный электролитически (в растворе соляной кислоты). Известно, что этим способом сурьма отлагается в особом аллотропическом состоянии; нагреванием ее приводят в обычную разновидность. Вот полученные результаты, расположенные в том порядке, в котором были проведены опыты:

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
Комнатная температура	18	**0.683**
	240	0.676
	255	0.691
Комнатная температура	18	**0.850**

После новой регулировки прибора:

	$t°$	$-K \cdot 10^6$
Комнатная температура	18	**0.865**
	270	0.721
	432	0.583
	540	0.468
Комнатная температура	19	**0.936**
	580	Ампула лопнула

Легко видеть, что играют роль две причины изменения. В сурьме происходит превращение, сопровождаемое изменением ее структуры, так как после каждого нагревания коэффициент намагничения, измеряемый при комнатной температуре, повышается и переходит последовательно от значения 0.683 к значению 0.850 и далее — к 0.936. С другой стороны, коэффициент намагничения сильно уменьшается, когда температура растет; например, при 540° коэффициент намагничения почти в два раза меньше, чем при комнатной температуре.

Случайность положила конец этим опытам. Изучение этого вещества будет возобновлено и даст, наверно, интересные результаты [8].

Висмут. Чистый висмут, продаваемый в виде палочек, поверхности которых тщательно проскабливали куском стекла, по-видимому, не содержит следов железа. Сначала мы проводили измерения с висмутом именно такого происхождения. Четыре образца дали при 20° для ($-K \cdot 10^6$) следующие значения: 1.30, 1.04, 1.25, 1.22 со средним значением 1.20 или 1.25 (если исключить значение 1.04).

Затем мы воспользовались висмутом, полученным электролитически; он дал нам для четырех образцов значения: 1.38, 1.351, 1.36, 1.34 со средним значением 1.358.

Более высокое значение коэффициента у этих образцов, полученных электролитически, не может быть приписано какому-либо одному из алло-

тропических состояний металла, ибо после плавления коэффициент намагничения этих образцов не изменился. Это более высокое значение коэффициента, вероятно, должно быть приписано большей чистоте этих тел.

Мы приняли для коэффициента намагничения K висмута значение

$$(-K \cdot 10^6) = 1.35.$$

Измерения со вторым образцом электролитического висмута были проведены особенно тщательно, и значение, полученное для него, мало отличается от этого среднего.

Эттингсхаузен [15] нашел для висмута

$$(-K \cdot 10^6) = 1.37.$$

Если повышать температуру, коэффициент намагничения висмута уменьшается по абсолютной величине, причем закон этого изменения — линейный, так что значение K_t коэффициента намагничения при t° между комнатной температурой и температурой плавления, между 20 и 273°, можно представить формулой вида

$$10^6 \cdot K_t = 10^6 \cdot K_{20}\,[1 - \alpha\,(t - 20)].$$

Два продажных образца висмута дали для α значение 0.00105.

Пять образцов электролитического висмута дали для α значения: 0.001178, 0.001150, 0.001190, 0.001110, 0.001144, среднее из которых равно 0.001154. Это число значительно выше того, которое было найдено для образцов продажного висмута, разность составляет около 10%. Мы примем для α значение 0.00115. Тогда между 20 и 273° мы имеем

$$10^6 \cdot K_t = 1.35\,[1 - 0.00115\,(t - 20)].$$

Например, в одной серии опытов были найдены следующие значения:

t°	$-10^6 \cdot K_t$	$\frac{K_t - K_{20}}{K_{20}\,(t - 20)}$
20	1.355	
83	1.258	0.001136
137	1.165	0.001196
200	1.086	0.001102
256	0.989	0.001144

Последняя колонка содержит значения величины α, вычисленные по данным, относящимся к каждой температуре, и по данным, относящимся к температуре 20°. Из этой таблицы и из рассмотрения точек, нанесенных

[15] A. Ettingshausen, Wied. Ann., **17**, 272, 1882; Wien. Sitz. Ber., 96, 777, 1887.

на рис. 5, видно, что мы имеем линейный закон изменения. Во всяком случае можно сказать, что эти опыты были недостаточно точны для того, чтобы обнаружить у кривой $K=f(t)$ какую-нибудь кривизну в ту или иную сторону. Следует еще заметить, что температура определялась только с точностью до нескольких градусов и что относительная погрешность величины K была порядка $^1/_{200}$, что дает значительно более высокие значения относительных ошибок для α.

При температуре плавления (273°) коэффициент намагничения висмута в твердом состоянии равен $(-10^6 \times \times K_{273})=0.957$, т. е. равен $^7/_{10}$ его значения при 20°. При плавлении висмута его коэффициент намагничения в твердом состоянии внезапно становится в 25 раз меньше.

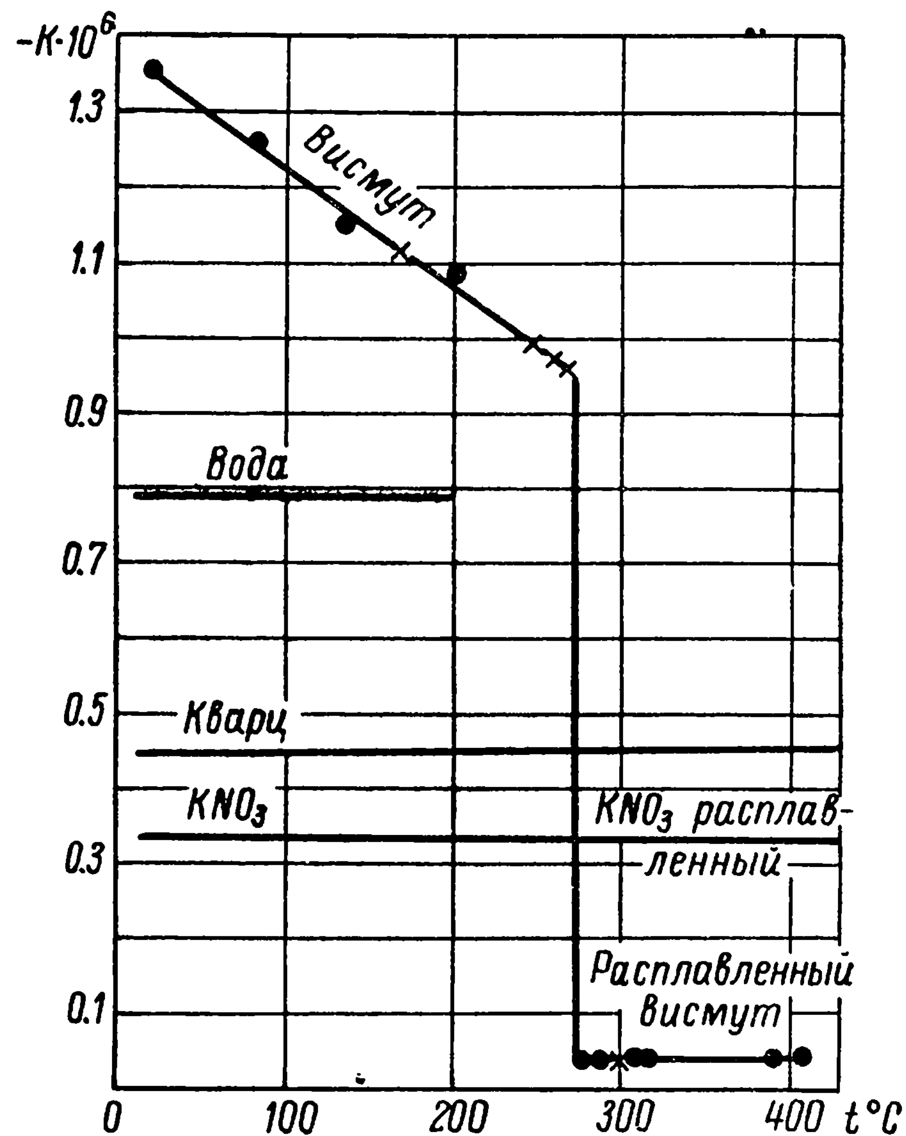


Рис. 5.

Среди изученных диамагнитных тел расплавленный висмут имеет наименьший удельный коэффициент намагничения. Этот коэффициент остается постоянным между 273 и 408°. Мы нашли следующие значения $(-10^6 \cdot K)$ для трех образцов продажного чистого висмута в расплавленном состоянии: 0.040, 0.035, 0.030 и среднее из них 0.035. Для трех образцов электролитического висмута в расплавленном состоянии мы нашли 0.037, 0.038 и 0.042 (последнее число относится к грубому измерению, проведенному со слишком малым количеством вещества); мы примем для коэффициента намагничения расплавленного висмута между 273 и 400°

$$(-K \cdot 10^6) = 0.38.$$

Особое состояние висмута в момент плавления. В некоторых сериях опытов мы стремились проводить измерения очень близко к температуре магнитного превращения (рис. 5). Мы при этом обнаружили, что спад значений величины K происходит совершенно внезапно при температуре 273° или по крайней мере, что он происходит полностью в интервале температур меньше 2°. Мы также установили, что это изменение происходит при одной и той же температуре как при нагревании, так и при охлаждении.

Мы убедились также, что это явление резкого изменения коэффициента намагничения точно соответствует внезапно наступающему явлению плав-

ления. Это именно и есть то заключение, которое, как мы полагаем, можно вывести из довольно любопытных опытов, на первый взгляд как будто приводящих к заключению, прямо противоположному. Речь здесь идет о следующем: висмут в виде маленьких осколков, величиной в несколько миллиметров, помещали в ампулу, в которой создавали вакуум. После этого его нагревали в приборе, служащем для изучения магнитных явлений, и температуру осторожно повышали вплоть до температуры несколько выше температуры магнитного превращения, заботясь о том, чтобы превращение ее было возможно меньше. Когда магнитное превращение заканчивалось, т. е. когда коэффициент намагничения больше не изменялся и достигал значения, соответствующего жидкому висмуту, прибор оставляли охлаждаться. Мы были весьма удивлены, обнаружив, что кусочки висмута не изменились: ни их внешний вид ничем не отличался от того, что было до нагревания, ни их взаимное расположение; таким образом, не произошло никакой осыпки. Казалось, что висмут не был расплавлен, хотя магнитное превращение его произошло; однако, исследуя каждую маленькую крупинку, мы обнаружили, что их внутренняя структура совершенно изменилась. Если, например, пользоваться кусочками от палочки продажного висмута, образованной из расходящихся лучеобразно во все стороны от оси каждой палочки кристалликов, то после нагревания вместо лучеобразной структуры в каждом кусочке обнаруживались параллельные между собой расслоения. Если же пользоваться маленькими кусочками висмута, осажденного электрически и имеющего зернистую внутреннюю структуру, то после нагревания в каждом кусочке обнаруживаются большие, параллельные между собой расслаивания расплавленного висмута.

Соответственно этим фактам представляется весьма правдоподобным, что плавление висмута действительно происходит при нагревании выше температуры магнитного превращения, но так, что кусочки сохраняют свою форму. Не должны ли мы предположить, что вязкость жидкого висмута при температуре, близкой к температуре плавления, очень велика? Не следует ли думать, что почти незаметный окисный слой, покрывающий поверхность, играет какую-нибудь роль и ведет себя подобно твердой поверхностной корочке? Я не знаю, какое объяснение следует дать этому явлению.

Вот еще некоторые опыты, имевшие целью получить добавочные сведения по этому вопросу. Мы нагревали висмут в глицериновой ванне (висмут либо плавал в глицерине, либо находился в ампуле). Ртутный термометр показывал нормальную температуру плавления 266°. [16] Температуру висмута доводили до температуры, несколько превышавшей температуру плавления. Сперва казалось, что висмут не плавится, когда он был взят

---

[16] Значение 273°, показываемое термопарой в момент плавления висмута в приборе для магнитных измерений, было, вероятно, несколько превышено.

в виде маленьких кусочков; но с течением времени ребра этих кусочков начинали закругляться, грани сморщиваться и в конце концов разрушаться. При температуре, не превышавшей точку плавления больше чем на 1°, для полного слияния этих кусочков требуется больше $^3/_4$ часа. Если же несколько поворошить висмут в глицерине платиновой проволочкой, то все кусочки можно соединить вместе довольно легко. Этот опыт менее убедителен, чем те, которые проводились в магнитном приборе, так как точно не известен тот момент, когда можно быть уверенным, что каждый кусочек достиг температуры плавления [9].

Слабомагнитные тела

Я изучал кислород и палладий и провел также несколько опытов с воздухом и раствором сульфата железа в воде. В этой главе будут приведены также некоторые сведения о магнитных свойствах стекла и фарфора при разных температурах.

У слабомагнитных тел коэффициент намагничения не зависит от интенсивности поля для полей между 100 и 1350 единиц.

Кислород

Ампулы из стойкого стекла с толстыми стенками наполняли кислородом под давлением. Ампула *A* имела (рис. 6) стержень *aa*, служащий для удержания ее в электрической печи. Оттянутый тонкий кончик ампулы

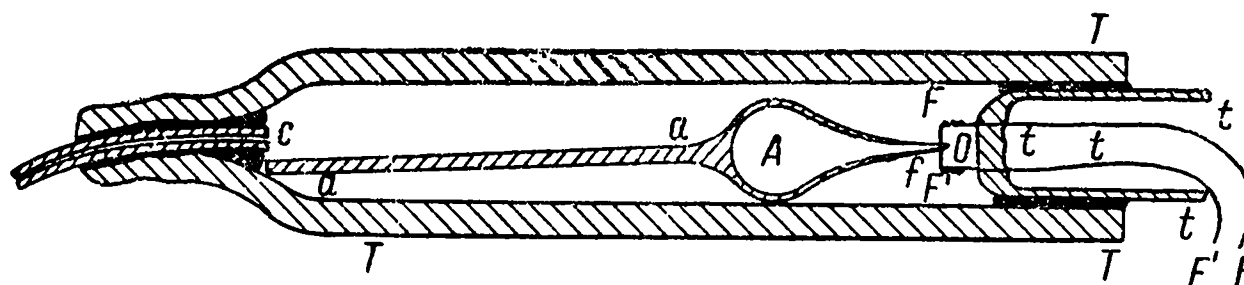


Рис. 6.

открыт. Чтобы наполнить и закрыть ампулу под давлением, ее помещали в более широкую трубку с очень толстыми стенками *TTT*; в этой трубке производили сжатие кислорода (после удаления из нее воздуха); ампула наполнялась газом, и оттянутый кончик *O* запаивался платиновой проволочкой *f*, доведенной электрическим током до красного каления.[17] Ампулу вынимали из трубки закрытой и под давлением.

Для внесения и извлечения ампулы из трубки *TTT* вынимали трубку *tttt*, вмазанную в первую. Сквозь эту закрывающую трубку проходили две толстые платиновые проволоки *FF* и *F'F'*, по которым под-

[17] Перо пользовался подобным же приемом для закрывания внутри котла баллона, наполненного паром (A. P e r o t, J. de phys., 7, 132, 1898).

водился ток к тонкой, слегка натянутой платиновой проволочке *f*, которую только одну и нужно было раскалять. Прежде чем вмазать трубку *tttt*, ампулу располагают так, чтобы ее оттянутый конец касался или даже слегка упирался в проволочку *f*. Необходимо, чтобы проволочка и стекло касались друг друга. [18] Газ подводился через трубку *c*, укрепленную на замазке с другого конца трубки *TTT*.

С ампулой, наполненной кислородом, проводили магнитные измерения как обычно, но вместе того, чтобы затем удалять ампулу из прибора для опорожнения, ее нагревали со стороны оттянутого кончика крошечным пламенем. Это вызывало ее вскрытие, большая часть газа выходила, давление внутри приходило в равновесие с атмосферным давлением; тогда кончик вновь запаивался тем же маленьким пламенем. Вес вытекшего газа слишком незначителен для того, чтобы при этом нарушалось равновесие крутильных весов. После этого можно приступить к опытам с ампулой, содержащей оставшийся газ, без того, чтобы требовалось заново отрегулировать ампулу; это большое преимущество с точки зрения точности результатов.

По получающейся разности оценивалось влияние утекшего газа; взвешивая ампулу до и после опытов, по разности определяли также массу вытекшего газа.

Масса газа в описываемых опытах варьировалась от 0.040 до 0.090 г; она определялась с точностью до $^1/_{20}$ мг, что вполне достаточно.

В этих двух сериях опытов ампула испытывала одно и то же влияние магнетизма наружного воздуха; это влияние исключалось при вычислении разности: тогда не надо вносить никаких поправок.

Мы пользовались сжатым кислородом, имеющимся в продаже; его заставляли проходить сквозь тампон из ваты, чтобы он не приносил с собой пылинок того железного резервуара, в котором он заключен.

Продажный кислород содержит довольно большое количество азота — около 9%. Собирали некоторые количества газа, выходящего из резервуара (в таких же условиях, как и при наполнении ампулы), и с помощью пиррогалола и поташа определяли объемное процентное содержание кислорода.

Согласно Фарадею, Беккерелю и Квинке, коэффициент намагничения азота по абсолютной величине по крайней мере в 100 раз меньше, чем кислород. Поэтому азот, содержащийся в ампуле, не должен влиять больше чем на $^1/_{1000}$ величины силы, действующей на газ. Значит можно принимать во внимание только кислород. В одном из измерений, например, было найдено, что объемное содержание кислорода во взятом газе составляло

[18] Оттянутый кончик можно запаять под атмосферным давлением с помощью маленькой платиновой спирали, нагреваемой током и окружающей этот кончик без соприкосновения с ним; в газе, находящемся под давлением, образуются потоки, приводящие к охлаждению, достаточному, чтобы в этих условиях воспрепятствовать плавлению стекла.

0.912. Весовое отношение было 0.921. Мы принимали, что 0.921 от веса газа, участвовавшего в опыте, приходилось на долю кислорода, и пренебрегали влиянием азота.

Для удельного коэффициента намагничения кислорода при температуре 20° мы нашли

$$10^6 \cdot K_{20} = 115.$$

Это результат наших самых тщательных измерений, проведенных с кислородом при давлении 18 атм.

Другие измерения, проведенные при таком же давлении, дали 114 и 113.5. Два измерения при давлении 5 атм. дали значение на 5% более высокое, но они были проведены со слишком большой для нашего прибора ампулой, и сами опыты имели целью изучить влияние изменения температуры. В пределах точности этих последних измерений можно сказать, что удельный коэффициент намагничения не зависит от давления.

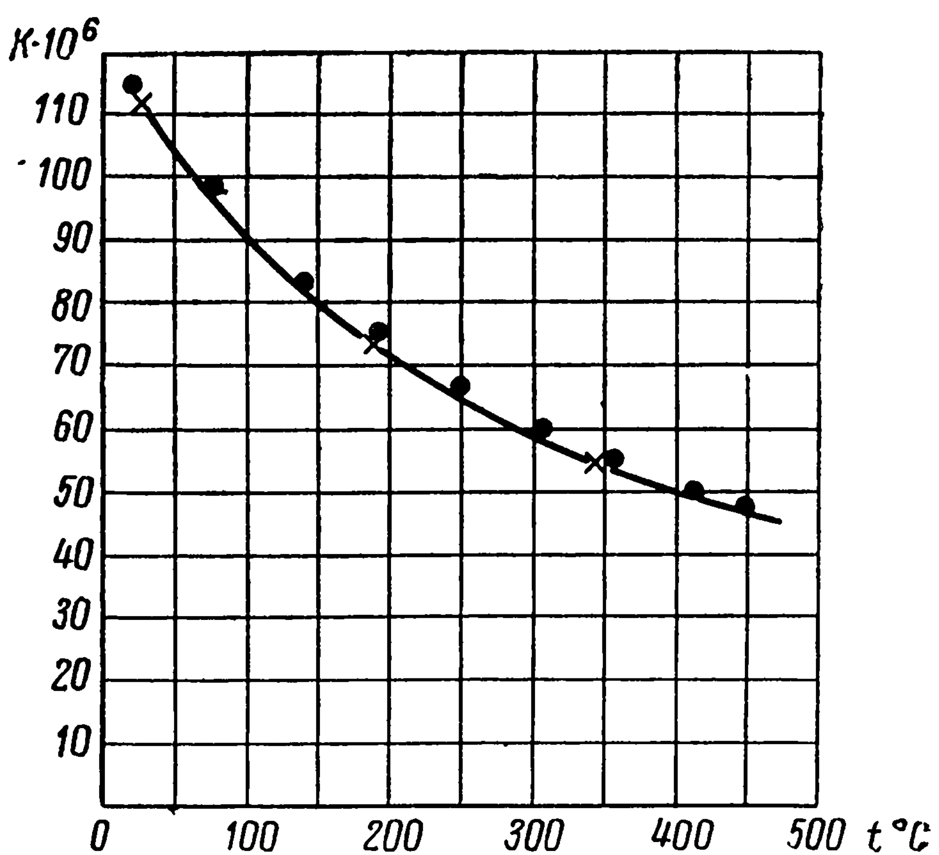


Рис. 7.

Значение коэффициента намагничения кислорода при 20° при давлении в 1 атм., отнесенного к таковому воды, взятой в том же объеме и в том же поле, составляет по нашим измерениям (—0.193); это число близко к числам, найденным Беккерелем (—0.182) и Фарадеем (—0.180).

Измерения, проведенные различными авторами по методу Квинке, не согласуются между собой. Мы вычислили по этим данным значение удельного коэффициента намагничения, приняв для приведения этих измерений к температуре 20° закон изменения с температурой, который мы укажем ниже.

Согласно Квинке, $10^6 \cdot K_{20}=116$.

По измерению Дюбуа [19] (проведенному при 15°), $10^6 \cdot K_{20}=87$.

Теплер и Хенниг (1888), а также Хенниг один [20] определили абсолютное значение разности объемных коэффициентов намагничения кислорода и воздуха при одном и том же давлении. В первой из этих работ авторы нашли $0.131 \cdot 10^{-6}$ при температуре 20°. Во второй — Хенниг нашел $0.096 \cdot 10^{-6}$ при 25°. Для удельного коэффициента намагничения кисло-

[19] H. Du Bois, Wied. Ann., 35, 137, 1888.

[20] A. Toepler, R. Hennig, Wied. Ann., 34, 790, 1888; R. Hennig, Wied. Ann., 50, 485, 1888.

рода при 20° эти два числа приводят соответственно к значениям $10^6 \cdot K_{20}=125$ и $10^6 \cdot K_{20}=94$.

Я провел две серии измерений при разных температурах. Первую серию — с ампулой из обычного стекла емкостью 7 см³, наполненную кислородом под давлением около 5 атм. и при комнатной температуре. Мы получили[21] ([табл. III], рис. 7, *крестики*):

[Таблица III]

$t°$	$10^6 \cdot K$	$\frac{33700}{T}$	Разности
25	113	113	0
185	73.3	73.5	—0.2
345	53.7	54.5	—0.8

Вторая серия была проведена с ампулой из твердого стекла емкостью 3 см³, наполненной кислородом при комнатной температуре, под давлением около 18 атм.; при 450° давление должно быть 45 атм.; ампула не деформировалась при этой температуре и под этим достаточно большим давлением. Мы нашли (табл. IV, рис. 7):

Таблица IV

t	$10^6 \cdot K$	$\frac{33700}{T}$	Разности	t'	$t-t'$
20°5	114.8	114.8	0	20°5	0
75	98	96.8	+1.2	71	+ 4
138	82.8	82.8	+0.8	134	+ 4
188	74.7	73.2	+1.5	178	+10
249	61.2	64.6	+1.6	236	+13
306	59.6	58.2	+1.4	292	+14
362	54.0	53.1	+0.9	351	+11
411	50.1	49.3	+0.8	400	+11
452	46.9	46.5	+0.4	446	+ 6
188	74.5	73.1	+1.4	179	+ 9
21.2	114.7	114.8	+0.1	20.7	+ 0.5

Как мы видим, коэффициент намагничения изменяется по гиперболическому закону; кривая на рис. 7 представляет значения K, вычисленные по формуле

$$10^6 \cdot K_t = \frac{33\,700}{T},$$

где $T=273+t$ есть абсолютная температура [10].

[21] При 25° было найдено значение 119; произвольно было сделано приведение к 113, чтобы совместить исходные точки обеих серий. Значения, соответствующие 185 и 345°, также были уменьшены в отношении 118 к 113. Первая серия была проведена только с целью установления закона изменения с температурой, а не имела в виду точно определить K при комнатной температуре.

Простое рассмотрение кривой и отмеченных на рисунке точек показывает, что эта кривая почти точно передает данные опыта. Зависимость $\log K$ от $\log T$ (рис. 12, стр. 181) изображается прямой с угловым коэффициентом, равным —1. Таким образом, закон изменения величины K чрезвычайно прост: *удельный коэффициент намагничения кислорода между 20 и 450° изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре.*

С какой точностью оказывается соблюденным этот закон? Позволяют ли эти опыты удостоверить наличие некоторого отклонения от него в каком-либо направлении? Мне довольно трудно ответить на оба эти вопроса. Первая серия указывает на прекрасное подтверждение. Отклонения несомненно ниже того, что следует ожидать, соответственно вероятной точности опытов. Вторая серия, наоборот, дает для K все время значения, несколько более высокие, чем вычисленные по формуле. Отклонения особенно заметны при 200 и 300°; найденные значения на 2.4% выше вычисленных. Между тем точность измерения притяжения составляет по крайней мере 1%, если дело идет о сравнительных измерениях без нарушения положения ампулы.

Если признать результаты этих опытов совершенно правильными, то мы придем к выводу, что при малых давлениях этот закон соблюдается совершенно строго, а при больших давлениях имеются заметные отклонения, причем кривизна изображающей его кривой менее подчеркнута. Я не думаю, что можно делать подобные заключения. Недостоверность результата происходит от некоторой возможной систематической погрешности в определении температур.

Действительно, никогда нет уверенности в том, что показание термопары дает точно среднюю температуру ампулы. В обеих указанных сериях мы находились в условиях, достаточно различных с этой точки зрения. В первой серии ампула имела довольно большой объем и нетолстые стенки. Во второй — ампула была меньше, но имела значительно более толстые стенки. В табл. IV для второй серии приведены значения t' и $(t-t')$. Здесь t' — это те значения температуры, которые удовлетворяют формуле для значений K, даваемых опытом. Максимальное отклонение достигает 14°; оно мне кажется слишком большим, чтобы его можно было приписать систематической погрешности; однако я не считаю возможным утверждать, что такое отклонение не может в некоторых случаях обнаружиться между температурой термопары и средней температурой ампулы.[22]

---

[22] В ходе этой работы мне часто приходится ссылаться на подобную недостоверность в точности оценки температуры. Я не считаю необходимым увеличивать число опытов с кислородом. Эти опыты длительны и требуют много забот; а поскольку причины ошибок имеют систематический характер, то, проделав в тех же самых условиях бо́льшую работу, я не приобрел бы значительно большей уверенности в этих результатах. Чтобы получить большую точность, следовало бы начать с усовершенствования конструкции нагревательной аппаратуры.

Мы поэтому удовольствуемся, сказав, что формула

$$10^6 \cdot K_t = \frac{33\,700}{T}$$

пригодна для вычисления удельного коэффициента намагничения кислорода с точностью, вероятно, превышающей 2% между 20 и 450° [11].

Воздух

Измерения, проведенные с кислородом, позволяют подсчитать магнитные свойства воздуха при разных температурах, если принять (согласно опытам Беккереля, Фарадея и Квинке), что влияние азота пренебрежимо. Вычисленный таким образом удельный коэффициент намагничения K воздуха выражается формулой [23]

$$10^6 \cdot K_t = \frac{7830}{T}.$$

Мы провели измерения с воздухом при атмосферном давлении и при температуре 24°. С этой целью была взята ампула большого объема с очень сильно оттянутым кончиком, в которой создавалась пустота, при помещении ее в ту же трубку (рис. 6); последняя служила для наполнения ампул кислородом и затем запаивалась в вакууме таким же способом. Пустая ампула помещалась в прибор для магнитных измерений; производили серию измерений, затем, ничего не нарушая, отламывали оттянутый кончик медными щипчиками; воздух входил в ампулу, и затем проводили новую серию измерений. Отклонения были малы, хотя измерения при низких температурах и при малых отклонениях можно было проводить с точностью до $^1/_{10}$ одного деления. Наконец, вес воздуха 0.0126 г подсчитывался по объему 10.26 см^3 и по изменению давления 750 мм.

Имея дело с такой большой ампулой, было невозможно пользоваться теми постоянными, которые определяют поле, но можно было провести серию измерений с ампулой, наполненной водой; мы получим тогда относительное значение для воздуха по отношению к воде и вычислим абсолютное значение, принимая для воды — $10^6 \cdot K = 0.79$. Таким путем для воздуха при 24° было получено $10^6 \cdot K_{24} = 26.6$. По формуле, приведенной выше, находим для той же температуры 26.3. Совпадение в пределах возможности получается удовлетворительное, даже лучше, чем можно было ожидать на основании вероятных погрешностей измерений. Этот опыт можно рассматривать как подтверждение того обстоятельства, что влияние азота не ощутимо.

---

[23] Приняв 22.23% кислорода по весу в составе воздуха (A. L e d u c, J. de phys., 9, 231, 1890).

Если предположить, что удельный коэффициент намагничения азота имеет тот же порядок величины, что и у большинства других диамагнитных тел, например воды, то отсюда следовало бы, что при 20° коэффициент намагничения воздуха примерно на 2% меньше, чем рассчитанный с учетом одного только кислорода. Около 400° влияние азота было бы около 4% и т. д., т. е. формула, вероятно, будет давать тем более неточные результаты, чем выше температура.

Коэффициенты намагничения воздуха при разных температурах необходимо знать для того, чтобы можно было вносить поправки в магнитные измерения, проводимые в воздухе. К счастью, для этой цели нет необходимости знать этот коэффициент с большой точностью. Для этого надо знать объемный коэффициент намагничения x. Если учитывать только кислород, то он определяется формулой

$$10^6 \cdot x_t = \frac{2760}{T^2}.$$

Если пренебречь влиянием азота, то объемный коэффициент намагничения воздуха будет обратно пропорциональным квадрату абсолютной температуры; при 20° имеем $10^6 \cdot x_{20} = 0.0322$. Для воды удельный коэффициент намагничения равен $10^6 \cdot K = 0.79$, а плотность ее равна 1, поправка, обусловленная присутствием воздуха, составляет 4%. Для тела плотности d эта поправка равна $0.0322/d$.

При 300° имеем $10^6 \cdot x_{300} = 0.0084$; для большинства тел этой поправкой можно пренебречь. Таким образом, при высоких температурах значения x, выражаемые этой формулой, становятся менее достоверными, но поправки на влияние воздуха становятся пренебрежимыми.[24]

Магнитные соли

Опыты Видеманна и Плесснера.[25] Видеманн открыл, что коэффициент намагничения всех растворимых магнитных солей уменьшается с увеличением температуры; что температурный коэффициент изменения коэффициента намагничения одинаков для всех солей; что этот [температурный] коэффициент изменения по абсолютной величине близок к коэффициенту расширения газов. Более новые опыты Плесснера подтвердили эти результаты.

Видеманн представил коэффициент намагничения K_t при $t°$ вблизи комнатной температуры линейной формулой вида

$$K_t = K_0 (1 - \alpha t). \qquad (1)$$

---

[24] Я произвольно принял, что в печи, открытой снизу и поддерживаемой при высокой температуре, состав воздуха не изменяется.

[25] G. Wiedemann, Pogg. Ann., 126, 1, 1865; P. Plessner, Wied. Ann., 39, 336, 1890.

Согласно Видеманну, $\alpha=0.00325$ для температур между 15 и 80°.

Согласно Плесснеру, $\alpha=0.00355$ для температур между 15 и 60°.

Видеманн нашел одно и то же значение α для растворов сульфата закиси железа, хлористого и хлорного железа, сульфата никеля, азотнокислого кобальта, железосинеродистого калия. Плесснер нашел одно и то же значение α для растворов перхлората железа, сульфата марганца, сульфата никеля, азотнокислого кобальта.

Эти результаты Видеманна и Плесснера показывают, что закон изменения коэффициента намагничения есть функция одной только температуры, в которую не входит никакого коэффициента, присущего рассматриваемому веществу. Если, кроме того, мы предположим, что температурный коэффициент изменения близок к коэффициенту расширения газа не случайно, а, напротив, выражает некоторый закон природы, то надо заключить, что это должно иметь место и тогда, когда за исходную точку берется всякая другая температура, помимо температуры тающего льда. Коэффициент расширения газов при всякой температуре, взятой за исходную, обратно пропорционален абсолютной температуре T; имеем

$$\frac{1}{K_t} \cdot \frac{dK_t}{dt} = \alpha = \frac{-1}{T}.$$

Если это справедливо при всякой температуре, то получается

$$K_t = \frac{A}{T}, \tag{2}$$

где A — некоторая постоянная, зависящая от природы соли. Коэффициент намагничения должен изменяться обратно пропорционально абсолютной температуре, т. е. согласно тому же закону, который мы установили для кислорода. Это есть логическое следствие из открытий Видеманна, если только близость значения α и значения коэффициента расширения газа не есть чисто случайное совпадение.

Мы обсудим более подробно опыты Видеманна и Плесснера, чтобы посмотреть, согласуются ли они с вышеприведенной формулой. Прежде всего заметим, что найденные для α значения меньше чем $0.00367={}^1/_{273}$, как это должно быть по формуле (2). Эти коэффициенты также слишком велики для закона обратной пропорциональности абсолютной температуры.

В пределах температуры, между которыми были проведены опыты, этот закон давал бы для коэффициента α значение около 0.0030.

Мы воспроизводим здесь (табл. V) ряд опытов Видеманна с водным раствором сульфата закиси железа: первый столбец показывает температуру t, второй — коэффициенты намагничения, выраженные в совершенно произвольных единицах, третий столбец содержит абсолютную температуру и четвертый — произведение KT, которое должно быть постоянным, если закон обратной пропорциональности абсолютной температуры выполняется точно.

Мы видим, что между 15 и 68° произведение KT постоянно, так как отступления несомненно имеют порядок величины возможных погрешностей этих измерений. Значение, полученное при 81°, слишком низкое.

Таблица V

$t°$	K	T	$KT \cdot 10^{-3}$
15	952	288	274
21	928	294	273
27	906	300	272
33	895	306	274
39	870	312	272
45	854	318	272
51	834	324	270
58.5	814	331.5	270
68	795	341	271
81	750	354	266

Приведем также ряд опытов Плесснера (табл. VI) с водным раствором сульфата кобальта.

Третий столбец дает значения α, вычисленные автором путем комбинирования результата, полученного при комнатной температуре (8.9°), с каждым другим результатом. Как мы видим, значения, полученные для α, становятся все меньше и меньше по мере того, как повышается конечная температура. Таким образом, закон изменения не линеен: величина K как функция t изображается кривой, выпуклой в сторону оси температур.

Произведение KT, согласно измерениям, проведенным между 44.3 и 60.9°, может рассматриваться как постоянное, но, если сравнить это произведение с тем значением, которое получается при комнатной температуре, то обнаружим заметную разницу в 2.6%.

Таблица VI

$t°$	K	$\alpha \cdot 10^6$	T	$KT \cdot 10^{-4}$
8.9	26052	—	281.9	734
44.3	22619	3603	317.3	718
45.8	22500	3576	318.8	717
47.7	22201	3685	320.7	712
56.9	21548	3490	329.9	711
59.0	21463	3409	332.0	712
60.9	21421	3324	333.9	715

Такие же замечания могут быть сделаны по каждому из измерений Плесснера. Согласно этим опытам, изменения величины K должны происходить несколько быстрее, чем этого требует закон обратной пропорциональности абсолютной температуре.[26]

Опыты с сульфатом закиси железа. Я провел несколько опытов с этой магнитной солью в водном растворе в интервале температур, несколько более широком, чем тот, который был в работах Видеманна и Плесснера. Я сделал только несколько попыток, так как мой прибор не был приго-

[26] Я укажу на одно замечание, которое я нашел в статье Плесснера. Магнитные растворы были заключены в стеклянную ампулу, в середине которой находился резервуар ртутного термометра. Автор в своих расчетах принял, что вода, стекло и ртуть обладают диамагнитными свойствами, которые уменьшаются по абсолютной величине, так же как и магнитные свойства магнитных солей. Он полагал, что если бы диамагнитные свойства этих веществ были неизменны, то те значения, которые он нашел для α, были бы излишне велики по абсолютной величине от 0.38 до 0.8%.

Согласно моим опытам, вода и ртуть обладают неизменяющимися диамагнитными свойствами, а диамагнитные свойства стекла сильно возрастают с температурой, как

ден для точных измерений температуры; тем не менее я мог констатировать, что закон изменения далек от линейности и что закон обратной пропорциональности абсолютной температуре по крайней мере в первом приближении пригоден для описания явлений.

[Таблица VII]

$t°$	$10^6 \cdot K$	T	$KT \cdot 10^6$
12	**85.8**	**285**	**24000**
46	75.6	319	24100
14.5	**84.1**	**287.5**	**24200**
108	63.2	381	24100
15	**83.0**	**288**	**23900**

Водный раствор сульфата закиси железа, предварительно освобожденный от воздуха, содержал 5.35 частей безводной соли и 94.65 частей воды на 100 частей раствора. Удельный коэффициент намагничения K безводного сульфата был вычислен в предположении, что при всех температурах раствора коэффициент намагничения воды равен $(-0.79 \cdot 10^{-6})$.

Измерения были проведены при 15, 46 и 108° [табл. VII].

Произведение KT коэффициента намагничения на абсолютную температуру есть число постоянное.[27]

Принимая закон обратной пропорциональности абсолютной температуре, получаем для сернокислого железа

$$K \cdot 10^6 = \frac{24\,200}{T}.$$

Значение этой константы не очень достоверно.

Опыты Плесснера с магнитными солями в твердом состоянии. Плесснер изучил также некоторые соли в твердом состоянии, предварительно высушенные при 250°. По данным этих опытов я вычислил произведение KT коэффициента намагничения на абсолютную температуру. Выражая KT в произвольных единицах, было, например, найдено:

Таблица VIII

θ	$K \cdot 10^6$	T	$TK \cdot 10^6$
22°	**5.3**	**295**	**1560**
134	3.85	407	1570
23	**5.3**	**295**	**1560**
312	2.78	585	1620
435	1.97	708	1400?
697	1.563	970	1520
22.5	**5.62**	**295.5**	**1660**
1108	1.10	1381	1520
1310	0.92	1583	1460
1370	0.875	1643	1440
24.6	**5.62**	**297.6**	**1670**

Для сернокислого марганца

$t°$	19.3	51.5	60.6
KT	1013	1018	1013

это мы увидим позже. Возможная ошибка, указанная Плесснером, действительно существует, и она еще больше, чем он предполагал. Поправка на этот источник ошибки такова, что она уменьшает расхождение, существующее между результатами измерения и законом обратной пропорциональности абсолютной температуре; тем не менее я не думаю, что она достаточна для достижения полного согласия.

[27] Во время этих опытов образовалось небольшое количество перекиси железа; вероятно, вода не была полностью освобождена от железа.

Для сульфата кобальта

$t°$	12.5	49.1	58.8	59.5
KT	1213	1228	1228	1227

Можно сказать, что для этих двух твердых тел закон обратной пропорциональности температуре выполняется точно.

Для сульфата никеля получено

$t°$	12.2	39.6	48.3	59.7
KT	590	589	580	551

У этой соли изменение происходит быстрее, чем это следует согласно закону обратной пропорциональности абсолютной температуре.

Палладий

Палладий, которым пользовались в этих опытах, был совершенно чистый.[28] Магнитные свойства этого металла были исследованы в интервале от комнатной температуры до 1370°.

Палладий в виде маленьких кусочков помещали в фарфоровую ампулу (подобную изображенной на рис. 8). Такое устройство позволяло сохранять вещество совершенно чистым, что могло бы и не быть, если бы его нагревали в платиновой ампуле. К сожалению, фарфоровые ампулы имеют толстые стенки и заметно магнитны. Так как палладий не производит достаточно сильных магнитных действий, то поправки на ампулу имеют величины того же порядка, что и измеряемые величины. Это неблагоприятное обстоятельство сильно мешало получению точных результатов, что прежде всего сказывалось на измерениях при не очень высоких температурах, которые оказались сомнительными, так как магнитные свойства фарфора сильно изменяются при изменении температуры. Приводим результаты измерения в том порядке, как они были получены (табл. VIII).

Таблица IX

θ	$K \cdot 10^6$	T	$TK \cdot 10^6$
15.6°	**5.64**	**288.6**	**1630**
231	4.02	504.0	2030
398	3.23	671.0	2170
15.6	**5.67**	**288.6**	**1640**
469	3.0	742.0	2230

Построив по результатам табл. VIII кривую K как функцию температуры θ, можно видеть, что опыты были не вполне удовлетворительны. Они, по-видимому, обнаруживают небольшое возмущение около 400°; но это сомнительно; необходимо было бы провести еще одну серию измерений. Значения последнего столбца таблицы показывают, что закон об-

[28] Г-н Финк, который провел исследование химических соединений этого металла, любезно предоставил мне совершенно чистый образец, приготовленный им самим.

ратной пропорциональности абсолютной температуре применим по крайней мере только как первое, довольно грубое приближение. Это видно и из рис. 13 на стр. 183. Точки представляют значения логарифма величины K, полученные из опыта и отложенные по оси ординат, как функции логарифма T, откладываемого по оси абсцисс, прямая

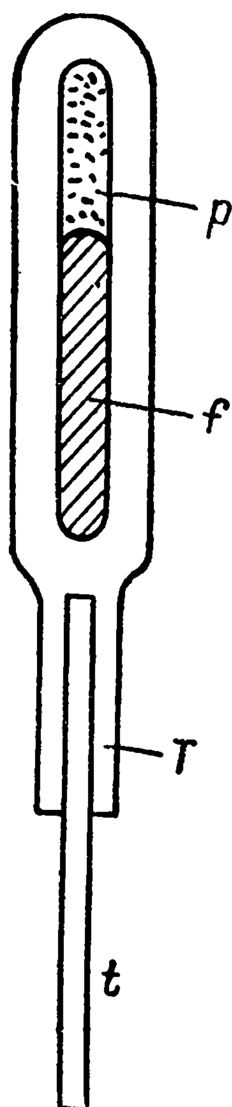


Рис. 8.

f — железо, помещенное в ампулу; *p* — фарфоровый порошок; *T* — фарфоровая трубка, припаянная к ампуле; *t* — фарфоровый стержень, поддерживающий ампулу в печи.

$$\log K = \log 0.00152 - \log T$$

соответствует формуле

$$K_\theta = \frac{0.00152}{T}.$$

Значения K, по-видимому, уменьшаются с повышением температуры быстрее, чем это указывает закон обратной пропорциональности абсолютной температуре, однако особенно замечательно, что этот закон пригоден для приближенного представления изменений коэффициента намагничения в громадном интервале температур до 1350°.

Прежде чем проводить эту серию опытов с очень чистым палладием, я произвел несколько измерений с образцом нечистого палладия, содержащего среди прочих примесей заметное количество железа. Полученные с этим образцом результаты дали почти то же значение коэффициента намагничения при комнатной температуре, что и у чистого палладия, но изменения температуры оказали совершенно иное влияние.

Коэффициент намагничения уменьшается при увеличении температуры значительно менее быстро, чем у чистого палладия. Закон обратной пропорциональности абсолютной температуре более уже не применим; из табл. IX видно, что произведение KT непостоянно.[29]

Стекло и фарфор

Стекло чаще всего диамагнитно, но иногда оно оказывается магнитным при комнатной температуре; это, очевидно, зависит от содержания магнитных окислов, входящих в его состав. В том случае, когда оно магнитно, стекло становится, однако, диамагнитным, если повышать его температуру. Во всех случаях диамагнитные свойства усиливаются при увеличении температуры. Скорость изменения тем больше, чем ниже тем-

[29] Это обстоятельство, может быть, следует сопоставить с тем, что дает изучение металлической проводимости. Проводимость чистых металлов изменяется почти обратно пропорционально абсолютной температуре, тогда как проводимость нечистых металлов изменяется с температурой менее быстро.

пература. Мы не проводили специального исследования, но вот, однако, три числа, определенных на стеклянном образце, взятом от трубки, предназначенной для опытов. Во второй строке приведены коэффициенты намагничения, выраженные в произвольных единицах:

θ	20°	196°	428°
K	(—43)	(—70)	(—78)

Изменения магнитных свойств стекла с температурой объясняются просто, если принять во внимание, что стекло состоит в главной своей части из диамагнитного вещества, свойства которого остаются неизменными при всякой температуре. Но, кроме того, оно содержит небольшое количество относительно сильно магнитного вещества, эти свойства которого уменьшаются по закону, близкому к закону обратной пропорциональности абсолютной температуре. Влияния, оказываемые этими двумя веществами, в значительной мере исчезают при комнатной температуре; при высоких температурах магнитное вещество не производит больше заметного действия, и стекло стремится стать диамагнитным со свойствами, не зависящими от температуры.

Мы исследовали температурные изменения магнитных свойств большого числа стеклянных ампул, вообще слабодиамагнитных при комнатной температуре. Эти температурные изменения весьма неприятны. Предположим, например, что мы изучаем некоторое диамагнитное вещество с коэффициентом намагничения, постоянным при всех температурах; это постоянство можно выявить только из разницы двух серий измерений (одной с *ампулой+тело* и другой — *с одной только ампулой*), варьируя обе серии одинаковым образом по температуре. Постоянство коэффициента будет установлено более легко и более надежно, если ампулы обладают неизменными магнитными свойствами.

Фарфор ведет себя подобным же образом. Мы имеем данные только об ампуле из глазурованного фарфора из Байё (Bayeux). Эти ампулы довольно сильномагнитны при комнатной температуре и становятся диамагнитными лишь между 600 и 800°. Числа второго столбца пропорциональны магнитному действию при разных температурах для одной из фарфоровых ампул, покрытых глазурью:

θ	
19°	+520
75	+380
155	+280
235	+174
503	+ 93
714	+ 26
810	0
1030	— 37
1200	— 55

При невысокой температуре изменение магнитных свойств происходит чрезвычайно быстро.

Ферромагнитные тела

Я изучал железо, начиная от комнатной температуры и до 1360°, при полях, изменяющихся от 25 до 1350 единиц. Мною были также исследованы магнетит и никель, однако только при температурах выше температуры магнитного превращения. Наконец, я провел несколько опытов с чугуном.

Мягкое железо

Методика опытов. Известно, что в случае очень сильномагнитного вещества интенсивность намагничения зависит от формы тела, помещаемого в магнитное поле. Выгоднее всего воспользоваться очень длинным цилиндром, ось которого направлена вдоль поля. Когда приводят значения интенсивности намагничения в виде функции интенсивности магнитного поля, то подразумевают, что они относятся к цилиндру, бесконечно удлиненному в направлении поля.

При температурах, при которых железо сильно магнитно, я пользовался проволокой очень малого диаметра, длина которой (около 1 см) была направлена вдоль поля (по оси Oy на рис. 1, середина проволоки была в точке O). Проволока была расположена в стеклянной или в платиновой трубках, которые защищали ее от окисления. Трубка с железной проволокой была укреплена на подвижной каретке крутильных весов, так же как ампула в описанных ранее опытах. Таким образом, мы имели дело с очень малым количеством вещества, но в этом не было никакого неудобства; магнитные действия были очень сильны. Аппаратура не была приспособлена к изучению сильномагнитных тел, и результаты опытов должны были быть несколько изменены путем введения ряда поправок.

Возмущающая пара сил. Если направление намагничения не параллельно направлению поля, а образует с ним некоторый угол Θ, то тело будет подвержено действию некоторой силы f и некоторой пары сил; эта пара сил будет способствовать повороту подвижной каретки и может в некоторых случаях быть по величине сравнимой с парой, обусловленной силой f, действующей на конец плеча рычага l крутильных весов. У слабомагнитных тел намагничение всегда параллельно полю; у магнитной проволоки намагничение стремится быть ориентированным в направлении проволоки.

Пусть будут m — масса железной проволоки, I_1 — интенсивность намагничения, отнесенная к единице массы, H — интенсивность поля. Не учитывая малые величины 2-го порядка, которые пренебрежимы, мы всегда имеем

$$f = mI_1 \frac{dH}{dx}, \tag{1}$$

и возмущающая пара сил будет $mI_1H\Theta$.

Обозначим через β угол отклонения крутильных весов и через c — крутильный момент нити этих весов на единицу угла; будем иметь

$$c\beta = fl - mI_1H\Theta, \tag{2}$$

откуда

$$I_1 = \frac{c\beta}{m\frac{dH}{dx}l\left(1 - \frac{H\Theta}{\frac{dH}{dx}l}\right)}.$$

Обозначим через I кажущуюся интенсивность намагничения без поправки, получим

$$I_1 = \frac{I}{\left(1 - \frac{H\Theta}{\frac{dH}{dx}l}\right)}.$$

Для нашего прибора мы имели (см. стр. 134)

$$\frac{H}{\frac{dH}{dx}} = \text{const} = 0.188 \text{ и } l = 5.42 \text{ см},$$

откуда

$$I_1 = \frac{I}{1 - 0.981\Theta}. \tag{3}$$

Обозначим через n число делений микрометра, соответствующее углу Θ. Для нашего прибора мы имели

$$\Theta = 0.000105n$$

и уравнение (3) можно еще приближенно написать

$$I_1 = I(1 + 0.000104n). \tag{4}$$

Угол Θ может быть обусловлен отклонениями, которые происходят при измерениях: он может быть тогда вычислен, и указанная поправка определяется по уравнению (4). Но часть угла Θ может быть обусловлена недостатками регулировки, если железная проволочка не направлена точно вдоль поля в среднем положении каретки.

Отсюда возникает неизвестная поправка, незнание которой чаще всего ведет к ошибке, состоящей в том, что опускается множитель, имеющий некоторое постоянное при всех измерениях значение.

Направление железной проволочки лучше всего регулировать, пользуясь отметками, нанесенными на планшетке, которую применяют для регулировки ампул; однако эта регулировка не очень точна.

Поправка на изменение положения тела в поле. Имея дело с телом, коэффициент намагничения которого постоянен или почти постоянен, каково бы ни было поле, мы видели, что действующая на это тело сила постоянна независимо от положения тела в пределах перемещения, соответствующих делению микрометра. Это следует из того, что выбранное среднее положение тела соответствует максимуму произведения $H\frac{dH}{dx}$. Для железа это уже не имеет места, так как K изменяется вместе с H.

Пусть H_1 и $\left(\frac{dH}{dx}\right)_1$ суть элементы поля, соответствующие некоторому среднему положению 1 и известные из предварительных опытов. Пусть H_2, $\left(\frac{dH}{dx}\right)_2$ — те же элементы для положения 2, занимаемого телом после небольшого перемещения x. Имеем

$$H_2 = H_1 + x\left(\frac{dH}{dx}\right)_1 \tag{5}$$

и

$$\left(\frac{dH}{dx}\right)_2 = \left(\frac{dH}{dx}\right)_1 + x\left(\frac{d^2H}{dx^2}\right)_1. \tag{5'}$$

Пусть β — угол отклонения, I_2 — интенсивность намагничения тела в его положении 2 и I_1 — *кажущаяся* интенсивность намагничения, вычисляемая из числовых таблиц, как если бы тело было в положении 1; мы имеем

$$I_1 = \frac{c\beta}{lm\left(\frac{dH}{dx}\right)_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{c\beta}{lm\left(\frac{dH}{dx}\right)_2},$$

откуда, учитывая (5′),

$$I_2 = I_1\frac{\left(\frac{dH}{dx}\right)_1}{\left(\frac{dH}{dx}\right)_2} = \frac{I_1}{1+\left[\left(\frac{d^2H}{dx^2}\right)_1 : \left(\frac{dH}{dx}\right)_1\right]x}. \tag{6}$$

Но известно, что $\left(\frac{dH}{dx}\right)H$ максимально в положении 1; отсюда следует

$$\left(\frac{dH}{dx}\right)_1^2 + H_1\left(\frac{d^2H}{dx^2}\right)_1 = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\left(\frac{dH}{dx}\right)_1}{H_1} = -\left(\frac{d^2H}{dx^2}\right)_1 : \left(\frac{dH}{dx}\right)_1 \tag{7}$$

и (6) можно записать в виде

$$I_2 = I_1\frac{1}{1-\left(\frac{dH}{dx}\right)_1\frac{x}{H_1}}. \tag{8}$$

Формулы (5) и (6) позволяют произвести поправки к I и H. Для нашего прибора мы имели

$$\frac{1}{H_1}\frac{dH_1}{dx}=0.188 \text{ и } x=0.000570n, \tag{9}$$

где n — число делений микрометра, соответствующих перемещению x в поле. Формулы (5) и (8) принимают вид

$$H_2=H_1(1+0.000107n) \tag{10}$$

и

$$I_2=I_1(1+0.000107n). \tag{11}$$

Во всех случаях имеет место соотношение

$$\frac{I_2}{H_2}=\frac{I_1}{H_1}. \tag{12}$$

Расчет поправок. Предположим, что у применяемых железных цилиндрических проволочек отношение длины к диаметру очень велико; предположим, кроме того, что интенсивность намагничения всегда параллельна магнитному полю внутри железа (это равносильно пренебрежению составляющей остаточного магнетизма в направлении, перпендикулярном к оси цилиндрической проволочки); обозначим, как и раньше, через Θ угол между направлением поля и намагничения и через ω — угол между полем и осью проволочки; без труда находим

$$\frac{\omega}{\Theta}=1+\frac{H}{2\pi ID},$$

где D означает плотность вещества.

Простое рассуждение приводит к следующим выводам, если предположить $D=7.8$:

1°. *Всегда* можно внести в H и I поправки, выражаемые уравнениями (10) и (11). Эти поправки точны, но, тем не менее, они бесполезны, когда коэффициент намагничения постоянен, каково бы ни было H, ибо исправленные значения дают для K то же число, что и исходные значения.

2°. Если $K<0.0023$, то иных поправок нет, которые надо было бы вводить.

3°. Если $K>0.2$ (тогда приблизительно $\Theta=\omega$, намагничение направлено вдоль проволоки), нужно, кроме того, внести поправку, выражаемую уравнением (4). [Поправки (4) и (11) одного знака]. Может быть, имеется еще одна *неизвестная* поправка, обусловленная недостаточной регулировкой направления проволочки. Эта поправка, которой неизбежно пренебрегают, происходит от опускания некоторого *постоянного множителя*, каковы бы ни были K и n, лишь бы только было всегда $K>0.2$.

4°. Если $0.0023 < K < 0.2$, то всегда вносятся поправки (10) и (11), но поправка (4) применяется в уменьшенном размере; вместо (4) мы имеем соотношение (13)

$$I_1 = I\left(1 + \frac{0.000104n}{1 + \frac{H}{2\pi ID}}\right). \quad (13)$$

Однако, может быть, надо было бы предусмотреть еще какую-то другую *неизвестную* поправку, обусловленную несовершенством регулировки проволочки; эта поправка, которой также по необходимости пренебрегают, выражается в том, что опускают некоторый *множитель, изменяющийся* одновременно с K. Именно в этом последнем случае, если положение железной проволочки плохо отрегулировано, эта поправка наименее достоверна.

В предыдущих формулах и в последующих таблицах буква n обозначает разность между числом, отсчитываемым по микрометру в момент измерения, и числом, отсчитываемым тогда, когда каретка занимает свое среднее положение. Это n редко превышает 120 делений.

Мы старались опытным путем определить поправочный множитель для I. Для этого мы работали с железной проволочкой и в довольно сильных полях, чтобы небольшие различия в оценке H не изменяли величины I; кроме того, для каждого состояния поля мы определяли значения отклонений при смещении исходной точки на шкале микрометра.

Приводим несколько чисел из таблицы поправок для I: здесь φ есть окончательный поправочный множитель, вычисленный по формулам (4) и (11). В случае 3°, где эта поправка осуществлена, φ' есть тот же поправочный множитель, определенный опытным путем.

n	φ	φ'
40	1.008	1.012
80	1.017	1.024
120	1.025	1.036
140	1.030	1.042

Мы видим, что множитель, определенный опытным путем, больше вычисленного. Поскольку эти опыты были несколько ненадежны, то в качестве поправок мы взяли среднее из значений φ и φ'.[30]

Размагничивающее поле, обусловленное намагничением. Концы проволочки можно сделать немного тоньше, натирая их наждачной бумагой, и стремясь придать ей грубо форму эллипсоида. Пусть H есть внешнее

[30] Может быть, было бы лучше в качестве поправок просто взять данные опыта. (И все-таки приведенные расчеты были бы необходимы для того, чтобы составить себе представление о той доле полной поправки, которую надо вводить в разных случаях). Если бы эта поправка была немного больше, то кривые $I=f(H)$ (рис. 9) продолжали бы немножко повышаться при сильных полях и при низких температурах, вместо того чтобы быть совершенно горизонтальными.

поле и H' — эффективное намагничивающее поле $H'=H-\lambda ID$; здесь I — удельная интенсивность намагничения, D — плотность железа, λ — множитель, который в случае если длина a проволоки велика по сравнению с ее диаметром b, может быть вычислен по формуле [31]

$$\lambda = 4\pi \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left(\log_e \frac{2b}{a} - 1\right).$$

Только после проведения опытов я убедился в том, что для применения этой формулы необходимо, чтобы эллипсоиду была придана совершенная форма. В итоге я должен был отбросить ряд опытов, для которых эта поправка была существенна. В тех случаях, когда эта поправка очень мала, я ее вводил, пользуясь этой формулой. В том же случае, когда форма проволочки очень близка к форме цилиндра, множитель λ, подсчитанный для эллипсоида, мне представлялся слишком большим, если при этом предположить, что отношение большой оси к малой равно отношению длины цилиндра к его диаметру.

Опыты с проволочкой из мягкого железа диаметром 0.002 см (образец А).[32] Эта проволока была плохо отожжена. Ее нагревали при слабом растяжении в откачанной стеклянной капиллярной трубке. Кусок проволоки, которым мы пользовались в этих опытах, имел 1.37 см в длину и 0.00210 см в диаметре. Диаметр был измерен с помощью микроскопа, снабженного окулярным микрометром, который был предварительно сверен с эталонным микрометром, положенным под объектив. Отношение длины к диаметру было равно 653, и не было необходимости вносить поправку, предусматриваемую размагничивающим полем намагничения.

Масса $37.05 \cdot 10^{-6}$ г была определена по объему и плотности, принятой равной 7.8. Проволочка была помещена в плотно закрытую стеклянную капиллярную трубку.

Измерения с этим образцом были проведены при комнатной температуре (при 26°), затем — при 222, 418 и 563° и, наконец, снова при 26°. После нагревания при охлаждении наблюдалось более низкое значение; я не уверен, не следует ли это приписать недостаточному отжигу. Опыты с этим образцом не представляют большого интереса, так как не было возможности нагреть его выше 563°. Действительно, неизвестно, как предохранить столь малую массу от изменений при высоких температурах.

Кривые, полученные с этим образцом *A*, представляют ту интересную особенность, что интенсивность намагничения возрастает при слабых полях более резко, чем это имело место у образца *B*, исследованного позже [33] (табл. X).

---

[31] J. A. Ewing. Magnetic induction of iron. London, 1892.

[32] Г-н Гэфф любезно проволочил специально для меня эту проволоку, пользуясь алмазными фильерами, которые он применяет для волочения платиновых проволок.

[33] Другой образец из той же проволоки, исследованный в тех же пределах температуры, дал совершенно аналогичные результаты, которые мы сочли бесполезным приводить здесь.

Для каждой серии приведены сперва результаты опытов, проведенных во время возрастания поля; затем, под горизонтальной чертой, — результаты, относящиеся к периоду уменьшения поля.

Таблица X

25°		221°		418°	
H	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*
99 (?)	195	71 (?)	183	86 (?)	182
313	207	1562	196	158	188
562	214	565	206.7	319	189
781	214.4	796	208	560	190
961	215.3	1360	208.5	1339	191
1376	217.8				
		841	210	602 (?)	192
993	216 3	607	208	360	190
816	216.7	199 (?)	204		
594	214.6				
354	211				
195	205				

563°		После нагревания 25°	
H	*I*	*H*	*I*
71 (?)	147	99	186
127	154	313	202
314	160	787	209
782	161.4	1349	212
960	160.7		
1315	160	828	210
		357	204
996	160.8	139	198
827	161.6		
356	160		
195	159		
111 (?)	157		

Опыты с проволокой из мягкого железа диаметром 0.014 см (образец B). С этим образцом мы получили более полные результаты при температурах ниже температуры магнитного превращения. Проволока длиной 0.87 см имела массу 0.0010 г. Мы пользовались обычной продажной проволокой из мягкого железа; содержание углерода в ней было очень мало (0.44%). Она не содержала углерода в состоянии графита; не содержала также ни серы, ни фосфора, ни мышьяка.

Проволока сперва в течение целого дня прокаливалась при высокой температуре (около 1200°). Прокаливание велось в фарфоровом глазурованном тигле; проволока была засыпана мелким железным порошком, что предохраняло ее от окисления. Затем проволоку помещали в платиновую трубку, концы которой были заварены автогеном. Эта трубка с проволочкой и служила для измерений. К концу опытов железная проволочка оказывалась в хорошем состоянии; возможно, что поверхность была слегка платирована.

Отношение длины к диаметру было равно 62, и размагничивающее поле, обусловленное намагничением, было, вообще говоря, достаточно мало.[34] Без особенно большой ошибки можно было определить кривую $I=f(H)$ для комнатной температуры, и, однако, масса была еще достаточно заметна, чтобы можно было (беря нити крутильных весов все более и более тонкие) исследовать магнитные свойства вплоть до 780°.

[34] Эта поправка, между тем, существенна при не очень высоких температурах и при слабых полях; величина последних представляла, однако, некоторую неопределенность, так как эта поправка плохо известна. Для поля в 100 единиц поправка составляет 16 единиц.

Приводим таблицу результатов (табл. XI, рис. 9); все поправки внесены. Серии пронумерованы в порядке следования экспериментов. В каждой серии числа под горизонтальной чертой относятся к уменьшению поля.

Таблица XI

1 22°		2 688°		3 22°		4 275°		5 447°		6 601°		7 21°		8 688°	
H	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*
307	204	312	124	12 (?)	97	12 (?)	109	11 (?)	116	11 (?)	115	294	202	13 (?)	94
804	216	795	126	28 (?)	137	28 (?)	140	27 (?)	141	26 (?)	145	764	216	29 (?)	110
996	217	978	127	55	157	56	154	55	157	56	149	961	216	58	116
		1346	127	136	183	83	164	82	169	83	154			87	119
				297	202	136	181	135	179	137	157			140	121
				777	216	297	200	298	187	296	163			311	125
				973	216	770	207	772	188	771	164			773	127
				1348	216	965	207	964	190	955	164			954	128
				—	—	1330	207	1340	190	1318	164			1305	127
				812	217	—	—	—	—	—	—			—	—
				337	205	804	208	803	190	806	165			805	128
						336	204	337	188	337	164			343	126

Таблица XI (*продолжение*)

9 720°		10 740.4°		11 744.6°		12 748.2°		13 752.2°		14 756.4°		15 760.5°		16 21°	
H	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*
14 (?)	83	18	43 (?)	38	28 (?)	310	20.0	308	5.3 (?)	310	2.6 (?)	310	17.2 (?)	295	201
32 (?)	87	36	52 (?)	311	39.8	765	29.3	761	12.5	752	5.85	755	3.50	758	215
63	89	66	54	765	45.5	1282	370	1279	17.9	1262	9.45	1256	5.89	953	215
90	93	94	53	1296	50.2	—	—	—	—						
145	94	150	57.4	—	—	348	20.3	346	5.8						
302	98.2	305	58.3	347	40.0										
764	100.0	763	61.0												
950	100.3	952	62.2												
1310	100.7	1289	63.0												
—	—	1284	65.0												
794	100.8	—	—												
343	98.7	799	61.1												
		345	59.5												

Мы часто возвращались к комнатной температуре, но полученные результаты заметно не изменялись в ходе опытов. Были также проведены две согласующиеся между собой серии при 688°. После серии (2) температуру повысили до 770°; как мы видим, серия (3), проведенная после этого при 22°, согласуется с другими сериями, проведенными при комнатной температуре.

На рис. 9 между кривыми, относящимися к 748 и 752.2°, изображена кривая, полученная с более тонкой крутильной нитью, которая позволила несколько более точно определить форму кривой для слабых полей вблизи

температуры магнитного превращения. Мы только не указали температуру, так как из-за разборки и сборки прибора между этим опытом и первыми температура, указываемая термопарой, уже не была сравнимой

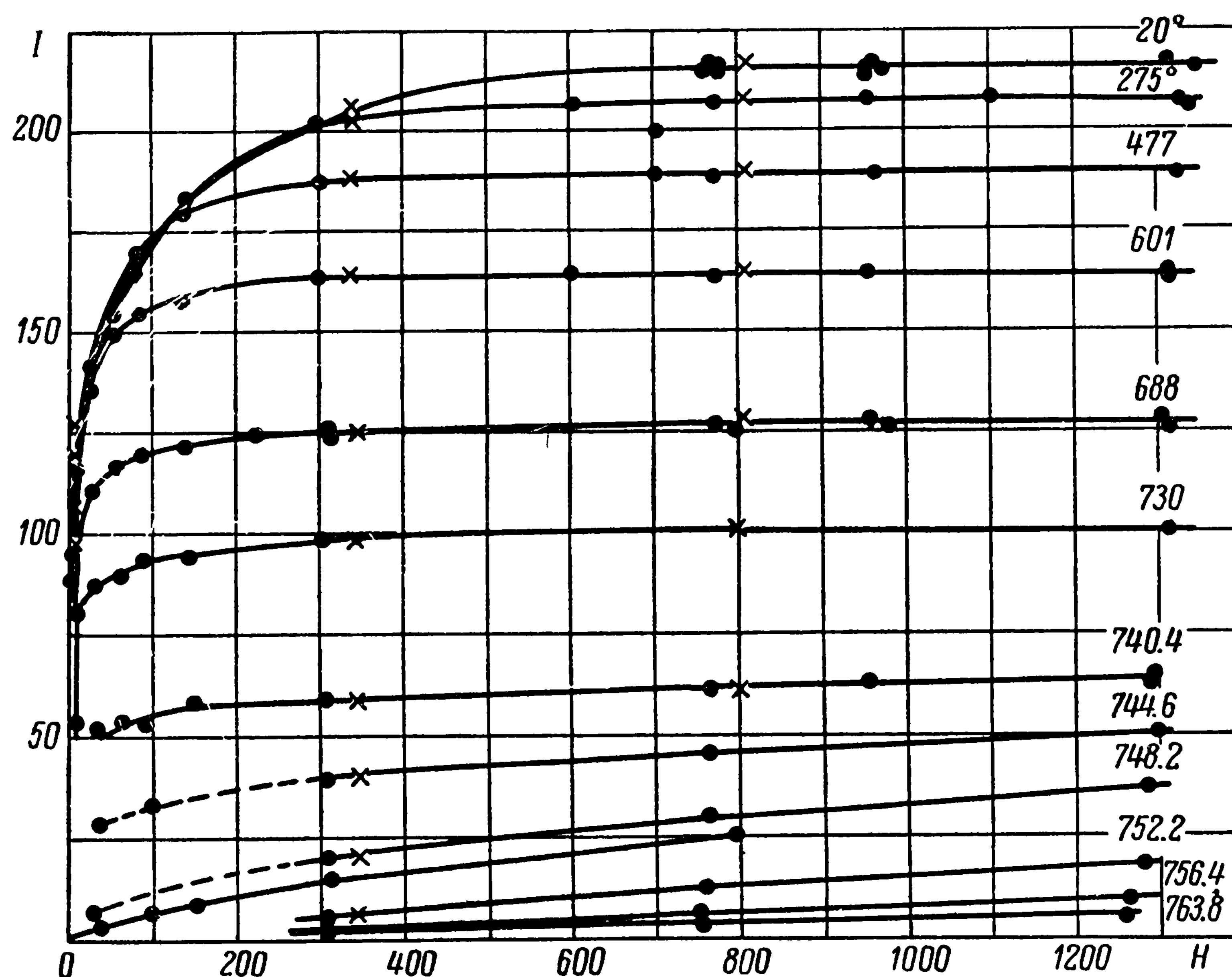


Рис. 9.

с той температурой, которая была до этого критической температурой. Действительно, достаточно изменения на несколько градусов, чтобы вызвать громадные изменения магнитных свойств.

Начиная с 760°, коэффициент намагничения уже более не изменяется; I как функция H есть прямая. Можно было продолжить измерения до 780°, но результаты становятся недостоверными, так как поправка на влияние платиновой трубки, заключающей проволочку, становится столь же большой, что и сама измеряемая величина. Тем не менее мы определили удельный коэффициент намагничения K при температуре θ.[35]

θ	$K\cdot 10^6$	θ	$K\cdot 10^6$
756.4°	7400 (?)	767.9	2700
760.5	4500	780.4	1450
764.4	3400		

[35] Другой образец той же проволочки B был исследован только до 450°. Мы не будем приводить этих результатов, которые согласовались с результатами, полученными для первого образца.

Опыты, проведенные с проволокой из мягкого железа диаметром 0.035 см (образец С). С этим образцом, того же происхождения, что и образец B, но имевшим несколько большую массу (0.0067 г), мы хотели, насколько только это было возможно, уточнить форму кривой $I=f(H)$ вблизи температуры магнитного превращения. Приближаясь к этой температуре, опыты становились трудными, и мы оказывались в особенно неблагоприятных условиях, так как интенсивность намагничения чрезвычайно быстро изменяется с температурой. Так, например, при 737° для того, чтобы можно было получить полезные результаты измерения, температуру надо поддерживать постоянной с точностью до 0.1° в продолжение

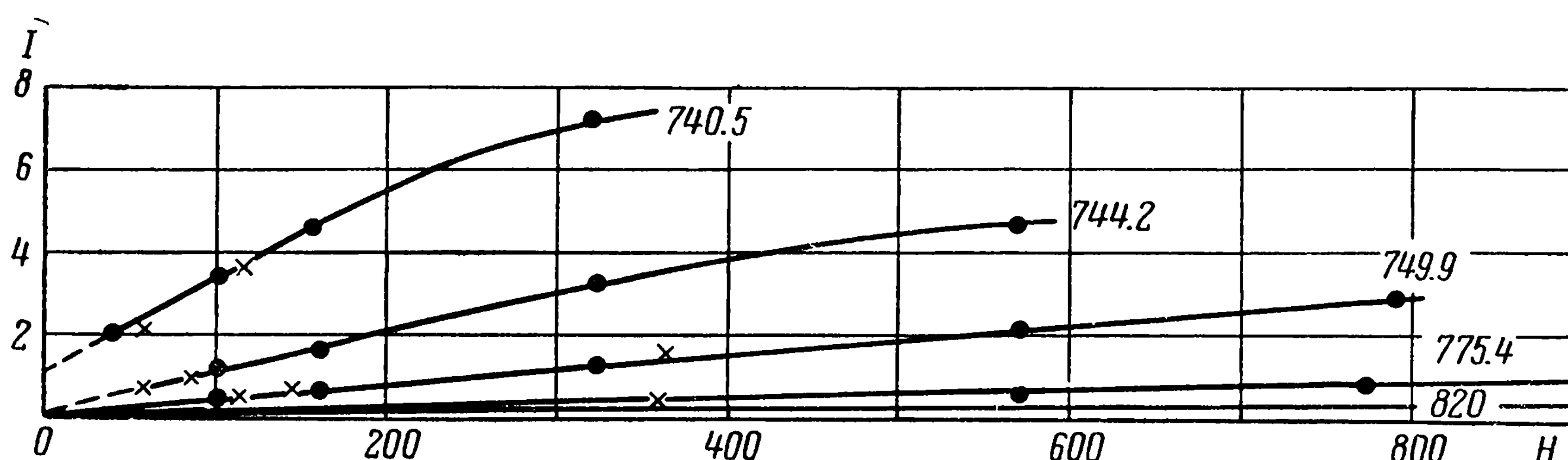


Рис. 10.

всей серии наблюдений. Один из наблюдателей, действуя реостатом на силу тока, нагревающего печь, был занят исключительно только тем, что поддерживал температуру совершенно постоянной, в то время как второй наблюдатель проводил магнитные измерения.

Результаты этих опытов приведены в табл. XII и на рис. 10.

Можно считать, что выше 744° кривая $I=f(H)$ представляет собой почти прямую. Коэффициенты намагничения были при этом:

Θ	$K \cdot 10^6$
744.2°	9700
749.9	3810
775.4	1092
820.0	366

Приведенные здесь значения градусов и десятых долей градусов представляют интерес только для определения разностей температуры в последовательности опытов, проведенных с одним и тем же образцом и при неизменном относительном положении термопары и тела.

Но указанные значения температуры, относящиеся к опытам, проведенным с различными образцами, как например B и C, сравнимы друг с другом только с точностью до 15°.

Опыты, проведенные при температуре выше температуры магнитного превращения (образцы D, E, F, G). При температурах выше 770° размаг-

ничивающее поле, обусловленное намагничением, незаметно, какова бы ни была форма тела. Поэтому можно брать гораздо более значительные массы железа, что, впрочем, и необходимо, так как намагничение становится все слабее и слабее. С другой стороны, начиная с 760 до 1375°, для

Таблица XII

737.3°		740.5°		744.2°	
H	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*
5.2 ?	21.4	42	2.04	103	1.13
11.5 ?	22.9	152	3.40	159	1.82
31	24.0	158	4.60	322	3.21
61	26.6	321	7.10	569	4.76
90	24.1				
73	23.4	113	3.60	84	0.98
44	24.9	54	2.18	55	0.72

749.9°		775.4°		820°	
H	*I*	*H*	*I*	*H*	*I*
101	0.407	101	0.12	766	0.28
160	0.654	324	0.36	1150	0.42
323	1.27	571	0.626	1333	0 50
570	2.18	573	0.882		
789	2.88	1327	1.422		
362	1.50	363	0.411		
143	0.67	143	0.168		
114	0.53				

Таблица XIII

Образец *D*

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
763°	4270	855°	292
797	950	794	1023
843	358	768	3310
924	32.5	760	6940 (?)
758	7330 (?)		

кривой $I=f(H)$ мы получили прямые линии. Достаточно поэтому давать значения K для каждой температуры.

При температурах выше 1100° становится уже затруднительно доводить опыты до желаемого конца. При таких высоких температурах глазурь печи плавится, фарфор размягчается и стержень ампулы имеет тенденцию сгибаться; малейшее случайное соприкосновение ампулы со стенками печи ведет к слипанию, и тогда приходится разбирать всю установку; наконец, силы, которые надлежит оценивать, имеют порядок величины $^1/_{10}$ мг.

Образцы D, E, F, G одного и того же происхождения. Они были вырезаны из стержня очень чистого мягкого продажного железа, содержащего 0.04% углерода и не заключавшего, по-видимому, заметных следов других посторонних тел.

Образцы D, E, G нагревались в тигле до 1200° перед их установкой в прибор (как это делалось с железным образцом B).

Образец D имел удлиненную в направлении поля форму (длина 0.55 см, диаметр 0.10 см, масса 0.0324 г). Он был вделан в платиновую трубку и тщательно защищен от цементации тонким слоем жженой магнезии. Можно было работать между 760 и 924°. Результаты представлены в табл. XIII.

Образец E имел уже значительно бо́льшую массу (0.44 г). Он имел форму небольшого цилиндра длиной 1.2 см и диаметром 0.27 см и был заключен в платиновую трубку, стенок которой касался.

Перед началом опытов железо в течение нескольких часов прогревали в его платиновой оболочке до 1000—1100°. Этот способ обработки оказался недостаточным; при исследовании этого железа после проведения измерений было обнаружено, что оно стало белым и блестящим на поверхности и внутри пропитано платиной в результате цементации.

Таблица XIV

Образец *E*

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
853°	68.1	1234°	26.8
817	197	1287	27.0
784	1810	1292	29.9
773	6090 (?)		
772	10080 (?)	889	30.4
		992	29.4
823	189	1082	27.9
845	93.7	1147	27.0
883	32.6	1225	26.5
1015	29.1	1084	27.6
1160	27.0	887	30.0

Платиновая трубка также была пропитана железом и стала довольно сильномагнитной (вес платины увеличился на 0.028 г, потерянных железом). Результаты представлены табл. XIV и рис. 11, кривая *4* с белыми кружочками. Эти результаты интересны с точки зрения изменения свойств железа, связанных с добавлением платины.

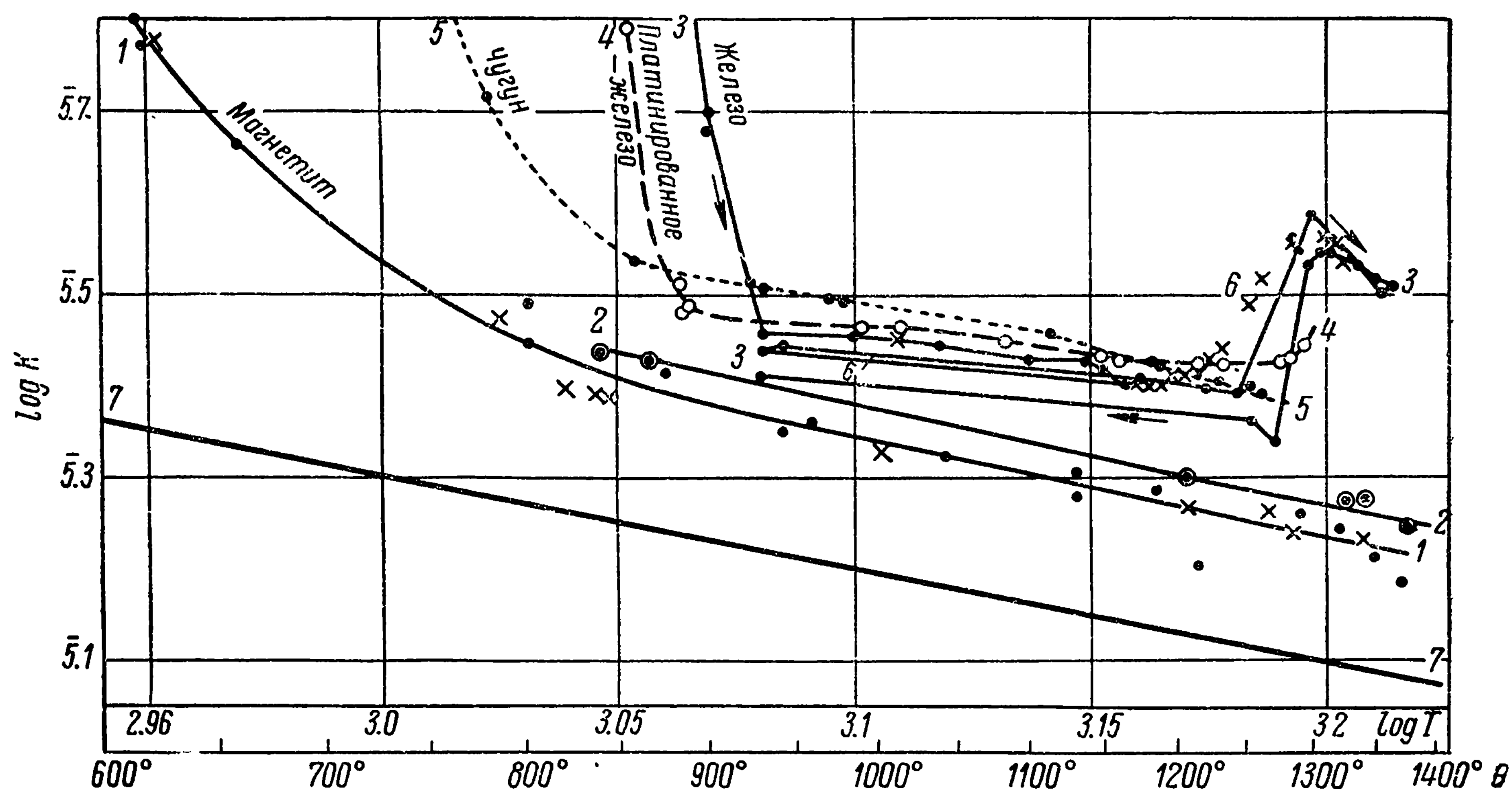


Рис. 11.

Образец F (масса 0.351 г) был вмонтирован в платиновой трубке, но был отделен от металла тонким слоем жженой магнезии. Можно было ра-

ботать между 753 и 1365°; после измерений железо ничего не потеряло в своем весе. Результаты представлены в таблице XV и на рис. 11 кривой *3* и черными кружками.

Таблица XV

Образец *F*

θ	K · 10⁶	θ	K · 10⁶
753°	4340 (?)	1162°	25.3
777	1320		
797	728	933	27.4
816	491	942	27.4
845	295	1175	25.7
900	50.1	1222	24.9
933	28.6	1245	24.6
		1295	35.8
797	705	1300	38.5
844	278	1353	32.8
865	197	1365	32.2
899	47.6		
933	28.8	1360	32.2
985	28.4	1336	34.2
1039	27.7	1315	34.8
1097	27.0	1308	35.0
1137	26.9	1297	34.2
		1271	21.8
1151	26.2	1254	23.0
1159	25.6	933	25.6

Образец G имел значительно большую массу (2.03 г); он был вмонтирован в ампулу из глазурованного фарфора (рис. 8), запаянную на кислородно-водородной горелке.

После опыта железо потеряло 0.044 г, т. е. около 2% своего веса, которые, прореагировав с фарфором, превратились в силикат. Эти результаты относятся к температуре между 1015 и 1355°. Они приведены в табл. XVI и на рис. 11 отмечены цифрой *6* и крестиками.

Изложение результатов, полученных с мягким железом при температурах ниже 770°. Кривые (рис. 9) и табл. XI, относящиеся к образцу *B*, позволили нам составить табл. XVII, которую мы рассматриваем как содержащую наиболее вероятный результат наших измерений при температуре ниже 770°.

Опыты дают значения интенсивности намагничения при намагничивающем поле, изменяющемся попеременно непрерывным образом от —1350 до +1350. Влияние гистерезиса чувствовалось очень мало, так как работа велась при достаточно сильных полях.

Таблица XVI

Образец *G*

θ	K · 10⁶	θ	K · 10⁶
1015°	28.2	1225°	26.6
1179	25.4	1234	27.6
1182	25.2	1253	31.0
1175	25.6	1265	33.0
1191	25.5	1287	36.1
1199	25.7	1310	36.6
1205	25.7	1319	36.0
1215	26.1	1329	34.6

Чтобы не усложнять рисунка, на нем представлены только те ветви, которые соответствуют периоду нарастания поля *H*. Эти восходящие ветви, вероятно, почти тождественны тому, что давали бы кривые первичного намагничения в пределах применяемых полей. Впрочем, ветвь, соответствующая периоду убывания поля, почти совпадает с ветвью периода возрастания его; заметное различие имеется только для полей ниже 100 единиц лишь тогда, когда температура слегка повышена.

Рассмотрение кривых приводит к некоторым замечаниям.

Таблица XVII

$t°$	Намагничивающее поле										
	1300	1000	750	300	150	100	75	50	25	15	10
20.0	216.3	216.2	215 7	201.3	183.7	171.8	164.3	153 7	136.0	123 (?)	—
275.0	207.5	207.5	207.1	200.3	184.3	171.1	162.0	151.8	138.0	126 (?)	117 (?)
477.0	189.6	189.5	188.9	186.8	180.3	173.0	166.2	155.0	140.5	129 (?)	117 (?)
601.0	164.0	164 0	164.0	162.9	158.8	154.9	152.0	147.8	137.0	129	114 (?)
688.0	127.1	127.1	126.8	124.7	121.8	119.9	117.9	114.7	108.6	100	89 (?)
720.0	100.7	100.4	100.1	97.8	94.4	92.9	91.0	88.4	84.5	82	—
740.4	64.0	62.3	61.3	58.5	57.1	55.2	53.0	50.5	46.0 (?)	—	—
744.6	50.1	47.6	45.4	39.2	34.6 (?)	32.5 (?)	31.0 (?)	29.5 (?)	27.0 (?)	—	—
748.2	37.3	31.1	29.2	19 4	14.0 (?)	11.5 (?)	10.0 (?)	8.7 (?)	6.5 (?)	—	—
752.2	18.2	15.0	12.2	5.3	3.5 (?)	—	—	—	—	—	—
756.4	9.62	7.4	5.55	2.22	1.11	0.74	—	—	—	—	—
760.5	5.85	4.5	3.38	1.35	0.67	0.45					
764.4	4.42	3.4	2.55	1.02	0.51	0.34					
767.9	3.51	2.7	2.03	0.81	0.40	0.27					
780.4	1 88	1.45	1.09	0.43	0.20	0 145					

Когда поле возрастает от 0 до 1300, кривые, относящиеся к двум различным температурам, сперва мало отличаются друг от друга, но вместе с тем и не сливаются на всем протяжении некоторой части их; затем эти кривые явно отдаляются.

Так, например, кривая, соответствующая 275°, едва отличается от кривой 20°, пока поле остается ниже 300 единиц. Точно так же кривая 477° мало отличается от кривых 20 и 275°, пока поле остается меньше 100 единиц и т. д. Можно представить себе некоторую *предельную кривую*, т. е. такую, к которой стремились бы все другие кривые при стремлении абсолютной температуры к нулю. Кривая, соответствующая какой-нибудь температуре, будет мало отличаться от этой предельной кривой на тем более длинном участке, чем ниже будет температура. Можно принять, что кривая 20° для полей меньше 450 единиц почти дает первую часть предельной кривой.

Чтобы облегчить объяснения, будем различать на каждой кривой три участка: начальный участок, о котором мы говорили; последний участок, для которого интенсивность намагничения почти постоянна, независимо от того, каково поле;[36] и, наконец, участок, который соединяет эти два участка. Для кривой 601°, например, начальный участок относится к полям ниже 40 единиц, промежуточный участок простирается до полей около 400 единиц; от 400 до 1300 единиц интенсивность намагничения почти

[36] См. сноску 30 на стр. 168.

постоянна. При 740° и при более высоких температурах последний участок исчезает.

Начиная с 756 и до 1375° эти кривые представляют собой прямые, проходящие через начало. Это значит, что для температур, превосходящих 756°, железо обладает постоянным коэффициентом намагничения (для намагничивающих полей в пределах от 25° до 1300 единиц).

Таким образом, железо постепенно переходит из состояния ферромагнитного тела в состояние слабомагнитного тела с постоянным коэффициентом намагничения.

Рис. 10 и табл. XII относятся к опытам, проведенным с образцом C с целью уточнить, насколько это возможно, форму кривой $f(H)$ для температур, близких к изменению ее хода.

При 737.3° (эти опыты не изображены на рисунке) I постепенно увеличивается от 22 до 24 для полей, изменяющихся от 7 до 90 единиц. Кривые должны проходить через начало и иметь там точку перегиба; из опытов, проведенных при 737.3, 740.5 и 744°, вытекает, что тогда мы должны иметь весьма быстрое возрастание намагничения I для слабых полей, связанное с очень резким изменением направления. Величина $\left(-\frac{d^2 I}{dH^2}\right)$ непременно должна проходить через максимум при значении поля более слабом, чем то, которое было в этих измерениях. При 775.4 и 820° коэффициент намагничения постоянен.

Можно попытаться составить себе представление о механизме изменения кривых при повышении температуры. Мы предлагаем следующее истолкование: на кривых, относящихся к ферромагнитному состоянию, мы различаем три участка. В первом участке, относящемся к слабым полям, коэффициент намагничения имеет очень большое значение (если отвлечься от явлений гистерезиса). Этот коэффициент имеет один и тот же порядок величины, какова бы ни была температура, и, пожалуй, несколько увеличивается с повышением температуры. По мере роста температуры протяженность этого первого участка становится все меньше и меньше, так что при 750° этот участок исчезает.

С другой стороны, когда температура повышается, то третий участок кривых с постоянной интенсивностью намагничения уже больше не обнаруживается в пределах применяемых полей. Вся кривая тогда состоит из части второго промежуточного участка, и эта часть очень скоро перестает обнаруживать заметную кривизну при тех значениях поля, которые были применены. Таким образом, мы приходим к следующему представлению: при высоких температурах железо начинает намагничиваться с громадным начальным коэффициентом, однако почти с самого начала образуется резкое изменение направления кривой $I=f(H)$, пока и поле, и интенсивность намагничения еще очень малы; затем кривая принимает вид прямой со значительно меньшим наклоном, которая, по-видимому, проходит через начало.

Опыты Гопкинсона представляются особенно подходящими для разъяснения того, что происходит при слабых полях вблизи температуры превращения, тем более что он весьма обстоятельно изучил этот вопрос. Однако явления магнитного гистерезиса очень усложняют эти результаты. Если попытаться отвлечься от явлений гистерезиса и восстановить то, чем была бы кривая $I=f(H)$, если бы они не существовали, то мы пришли бы, согласно этим опытам Гопкинсона, к тем же самым заключениям, которые мы хотим сформулировать.

Юинг [37] показал, что, помимо кривой первичного намагничения и кривой гистерезиса можно построить третью кривую, которую, я думаю, можно было бы назвать *кривой устойчивого намагничения*.

Интенсивность намагничения, соответствующую этой кривой, мы получали, подвергая механическим сотрясениям железную проволоку, целиком находящуюся в магнитном поле (или, еще лучше, сообщая ей электрические колебания, по Героза и Финци, пропуская переменный ток). Кривая устойчивой намагниченности проходит через начало; это кривая в некотором роде средняя между двумя ветвями кривой гистерезиса. Для мягкого железа мы получали такую же кривую, используя намагничивающие поля во время их нарастания или убывания. Именно об этом устойчивом намагничении я хотел сказать, когда выше говорил о попытках воссоздать интенсивность намагничения, отвлекаясь от явлений гистерезиса.

С другой точки зрения на рис. 12 (левая сторона) представлены результаты табл. XVII, где по оси абсцисс отложена температура θ и интенсивность намагничения I по оси ординат для полей в 25, 50, 75, 100, 150, 300, 750, 1000 и 1300 единиц. От 720 до 760° кривые, настолько сближаются между собой, что из них изображены только те, которые относятся к полям 25, 300, 1000 и 1300 единиц.

Для полей между 300 и 1300 единиц интенсивность намагничения постоянно увеличивается, если температура падает от 760 до 20°.

Но уже на кривой, относящейся к полю в 300 единиц, видно, что интенсивность намагничения стремится стать постоянной, когда температура становится достаточно низкой. Это же самое вытекает и из рассмотрения кривых, полученных при меньших полях в 150, 100, 75 и 50 единиц. (На этих кривых замечаются незначительные колебания, имеющие тенденцию приблизиться к некоторому среднему значению, однако это не могло быть достоверно установлено).

При поле в 25 единиц и при еще более слабых полях интенсивность намагничения проходит через максимум при температуре несколько ниже температуры превращения, а затем непрерывно спадает вместе с температурой. Это последнее явление имело очень важное значение в исследованиях Гопкинсона, который пользовался полями малой интенсивности. Я полагаю, что это явление в значительной мере вызвано некоторым по-

---

[37] J. A. Ewing. Magnetic induction of iron. London, 317, 1892.

бочным действием, обусловленным тем, что явления магнитного гистерезиса сильно возрастают при понижении температуры.

Кривые, относящиеся к полям в 1000 и 1300 единиц, сливаются между собой между 20 и 730°; при более высоких температурах кривая, относящаяся к полю в 1000 единиц, падает более быстро, чем относящаяся к полю в 1300 единиц, и достигает очень низких значений.

Кривая для $H=750$ единиц совпадает с кривой для $H=1300$ на несколько менее длинном участке своего хода; эти кривые стремятся разделиться, с одной стороны, при 20° и с другой — при 720°. Кривая $H=300$ приближается к кривой $H=1300$ между 477 и 720° и сильно от нее отходит при температурах выше 720° и ниже 477°. Это приводит к представлению о том, что существует *предельная кривая* $I'=f(\theta)$, к которой стремятся те кривые $I=f(\theta)$, о которых мы говорили, когда применяются намагничивающие поля большой интенсивности. Такая предельная кривая, вероятно, мало отличалась бы от кривой, соответствующей полю в 1300 единиц при температурах между 20 и 730°. Если такая кривая всегда существует, то при температурах выше 750° она должна была бы сильно отходить от кривой $H=1300$ и неизбежно должна была бы иметь точку перегиба между 730 и 800°. Для полей, превосходящих 1300 единиц, всякая кривая $I=f(\theta)$ очень приближалась бы к предельной кривой $I'=f(\theta)$ на участке тем более длинном, чем сильнее это поле. Кривая $I=f(\theta)$ при низких температурах отходила бы от этой предельной кривой, где она переходит в почти горизонтальную ветвь, и при высоких температурах, где она имеет сильно наклоненную ветвь.

Рассмотрение кривых показывает, что не существует такой определенной температуры, при которой бы происходило превращение железа. Вообще говоря, когда температура повышается, то интенсивность намагничения сперва снижается медленно, затем все быстрее и быстрее; скорость спадания магнетизма достигает своего наибольшего значения вблизи 740 или 750°; эти кривые имеют здесь точку перегиба. Выражение *температура магнитного превращения железа*, которым очень удобно пользоваться, имеет несколько неясный смысл; я думаю, что удобно так называть среднюю температуру точек перегиба кривых [12].

Представление результатов, полученных при температурах выше 770°. Результаты, полученные с образцами B, C, D, F и G, вообще находятся в согласии и дополняют друг друга. Однако для того чтобы привести кривые $K=f(\theta)$, насколько только это возможно, к совпадению, необходимо их сместить относительно оси температуры на несколько градусов, не переходя, впрочем, за пределы, соответствующие вероятной погрешности определения температуры. Мы сместили, таким образом, кривую для образца C на (+11°), для образца D — на (—3°), для образца F — на (+5°), чтобы привести эти кривые к продолжению кривой, соответствующей образцу C; затем мы построили некоторую среднюю кривую, послужившую нам для составления табл. XVIII, которую можно рассматривать

как итог наших измерений, проведенных выше 760°. Однако это не кривая $K=f(\theta)$, которая послужила нам для этой цели между 760 и 900°. Величина K изменяется с температурой столь быстро в этой области, что, если хотят получить общий взгляд на всю совокупность явлений, надо изобразить зависимость $\log I$ от температуры.

Таблица XVIII

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
756°	7500	820°	509	1100°	26.3
758	5800	840	348	1150	25.6
760	4680	860	238	1200	25.0
765	3270	880	138	1250	24.3
770	2420	900	61	1280	{ 23.9
780	1480	920	33.9		{ 38.3
790	1023	940	28.4	1300	36.9
800	776	1000	27.6	1330	34.8
810	625	1050	27.0	1336	32.3

На рис. 12 изображены кривые $I=f(\theta)$. Выше 760° коэффициент намагничения постоянен, I — пропорционально нулю; для более высоких

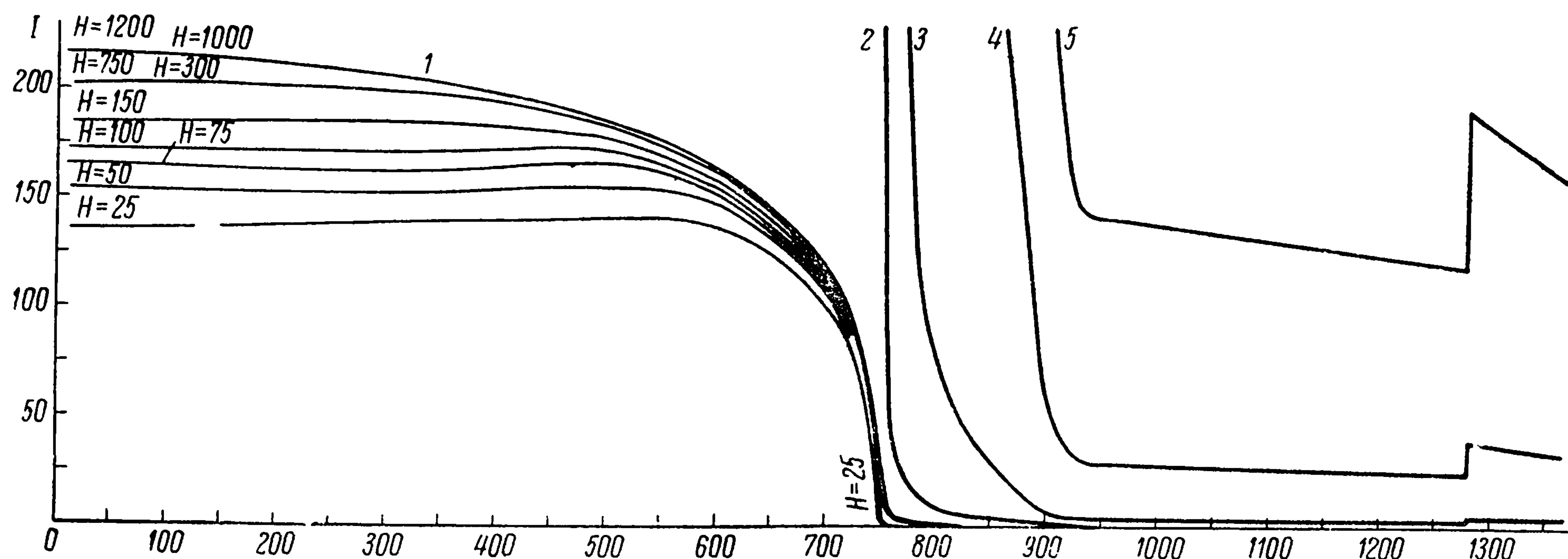


Рис. 12.

температур изображена только кривая $I=f(\theta)$, относящаяся к полю в 1000 единиц. Эта кривая *1* при указанном масштабе исчезает при 770°. Чтобы проследить ход явления, та же функция представлена кривыми *2*, *3*, *4*, и *5* в масштабе для I, соответственно в 10, 100, 1000 и 5000 раз большем. Так как поле, относящееся к этим кривым, равно 1000, то можно

сказать, что кривые *1*, *2*, *3*, *4* и *5* изображают в указанном масштабе соответственно значения $K \cdot 10^3$, $K \cdot 10^4$, $K \cdot 10^5$, $K \cdot 10^6$ и $5K \cdot 10^6$ для $H=1000$ и даже для всех значений H между 25 и 1300 единиц, когда температура выше 760°.

При температурах выше 750 и до 1280° интенсивность намагничения продолжает убывать со все меньшей и меньшей скоростью. Но от 750 до 950° относительное изменение интенсивности намагничения $\left(\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{d\theta}\right)$ все еще остается значительным. Интенсивность намагничения уменьшается до половины своей величины сначала за несколько градусов, а потом при повышении температуры на 20 или 30°.

От 950 до 1280° коэффициент намагничения остается почти постоянным и лишь немного уменьшается с ростом температуры.

При 1280° коэффициент намагничения внезапно увеличивается на половину своей величины, а затем от 1280 до 1365° опять уменьшается при увеличении температуры.

Мягкое железо вблизи 860° имеет еще другую особенность. Эта особенность почти не проявляется на рис. 12, но она становится явной, если построить кривую $\log I$ (или $\log K$) как функцию температуры θ. Угловой коэффициент касательной к этой кривой дает значение $\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{d\theta}$, которое при перемене знака представляет собой относительную скорость спадания интенсивности намагничения при изменении температуры.

Кривая для $\log I$ имеет первую точку перегиба около 750° при температуре, близкой к точке превращения, обнаруживая при этом максимум относительной скорости спадания; затем эта кривая имеет две другие точки перегиба, одну при 840° и другую при 880°, которые обнаруживают при этих температурах соответственно минимум и максимум величины $\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{d\theta}$.

На рис. 13 представлены значения логарифмов коэффициента намагничения ($\log K$) в функции логарифмов абсолютной температуры ($\log T$); такое представление очень удобно: логарифмическая шкала для коэффициента намагничения позволяет получить представление о всей совокупности магнитных свойств ферромагнитных тел; эта шкала, кроме того, позволяет объединить на одном рисунке кривые, относящиеся к различным магнитным телам, и сравнивать их между собой. Логарифмическая шкала абсолютных температур представляет собой наиболее естественную температурную шкалу для всех этих явлений.[38]

---

[38] В такой шкале температур бесконечно низкая температура есть $(-\infty)$, так же как бесконечно высокая температура есть $(+\infty)$. Единственно только отношения чисел, выражающих абсолютную температуру, определены без каких-либо добавочных соглашений. (См.: J. Lippman, J. de phys., (II), 3, 227, 1884). Разности логарифмов также определены.

Наконец, для таких тел, как кислород, палладий, магнитные соли, мы имеем соотношение $k = \frac{A}{T}$ (где A — некоторая постоянная), которое изображается прямой с угловым коэффициентом, равным (—1).

Явления, происходящие с железом при 750° (рис. 13, точка *a*), нормальны: это те же явления, которые наблюдаются у всех ферромагнитных тел при температурах, близких к температурам магнитного превращения.

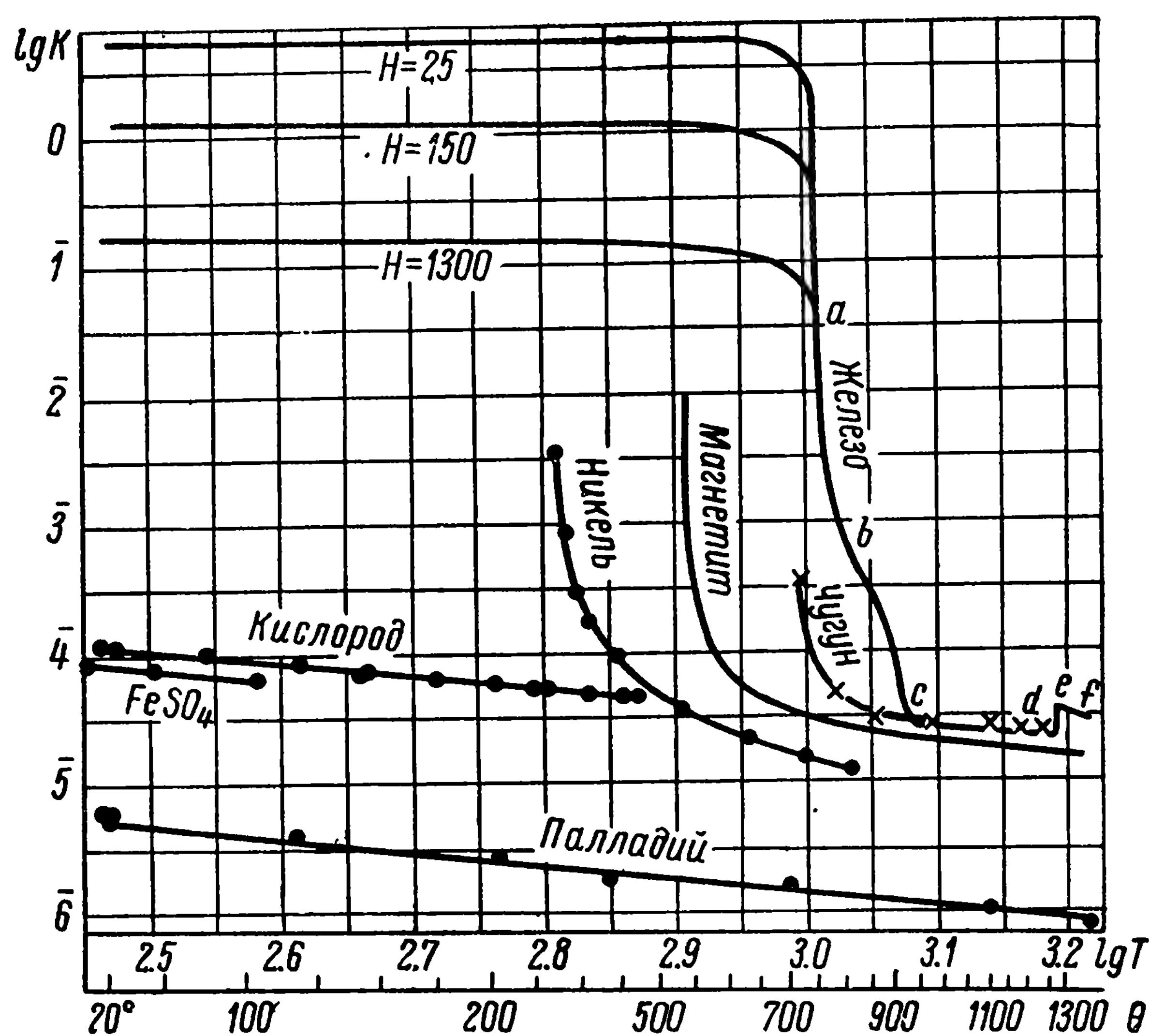


Рис. 13.

На рис. 13 ясно видно, что ход кривой от *a* до *b* между 760 и 860° дальше таким не сохраняется. Между 860 и 900° падение становится значительно более крутым: по обе стороны от 860° (точка *b*) имеются точки перегиба. Напротив, на кривой рис. 12 эти нарушения хода едва заметны и выражаются только легким выпрямлением кривой около 860°.

Теперь можно попытаться составить себе представление о том, что происходит в железе. Мне представляется соблазнительным приводимое ниже объяснение; я привожу его, однако, со всякими оговорками: можно было бы допустить, что вплоть до 860° железо ведет себя нормально, так же как и все другие ферромагнитные тела. Около 860° (рис. 13) железо начинает превращаться в некоторую другую аллотропическую разновидность; это превращение завершается около 920° (*e*) и железо остается в этом состоянии вплоть до 1280° (*d*); оно тогда подобно слабомагнитному телу, например палладию, кислороду. Наконец, при 1280° железо возвращается в свое первоначальное состояние и линия *ef* (от 1280 до 1366°) представляет собой как бы продолжение линии *ab*.

Линия *ab*, будучи продолженной вплоть до *f*, образовала бы кривую, напоминающую ту, которую дают магнитный железняк или никель.[39]

[39] Я высказал эту гипотезу, чтобы дать некоторую картину, передающую результаты моих опытов, а также чтобы выяснить, к каким следствиям она приводит, если их рассматривать изолированно. Я не предаюсь иллюзии, будто эти результаты сами по себе достаточны для разрешения трудного вопроса о превращении железа. Этот вопрос

Более подробное рассмотрение опытов. Следует отдать себе отчет в степени достоверности тех фактов, которые только что были описаны, и уточнить некоторые подробности, которые могут дать указания на природу явлений. *Магнитное превращение около* 750° происходит не резко, по крайней мере при сильных полях. Уменьшение интенсивности намагничения при повышении температуры происходит быстро только при слабых полях и притом тем быстрее, чем слабее поле; тенденция к резкому превращению имеется только тогда, когда поля становятся очень слабыми. Нельзя допускать, например, чтобы неравномерность температуры в железной проволочке маскировала это резкое падение. Действительно, образцы F и C были проволочками очень малой массы; они были помещены в платиновые трубки, расположенные в печи горизонтально. Разности температур должны быть чрезвычайно малыми в различных частях проволок; они тогда бы маскировали только самые ничтожные резкие спады.

Превращение, происходящее начиная с 860°, ускользнуло от меня, когда я проводил измерения, так как я не пользовался для представления величины K логарифмическими координатами. Изменение направления кривой для $\log K$ совершенно необходимо для объяснения значительного снижения, происходящего между 855 и 900°, согласно измерениям, проведенным с образцами D и E. Это снижение коэффициента намагничения с температурой мне уже не представляется более совершенно внезапным, хотя оно и происходит очень быстро.

Превращение, происходящее при 1280° и выражающееся в резком подъеме K, было сначала подмечено у платинированного образца E, который у границы температур, достигнутых в этих опытах (1290°), показал тенденцию к увеличению K (рис. 11). Существование этого увеличения, как я думаю, становится несомненным после опытов с образцом F. На рис. 11 можно проследить ход этих опытов (мы представили значения $\log I$ в функции $\log T$ и указали на шкале $\log T$ положения некоторых температур θ, выраженных по стоградусной шкале). Кривая *4* и светлые кружки относятся к образцу E. Кривая *3* и сплошные черные кружки относятся к образцу F. Все измерения были сделаны после того, как температура оставалась постоянной в течение времени, достаточном для того, чтобы кусок железа пришел в температурное равновесие с печкой и термопарой. С образцом E мы начали с нагревания до 1162°, проводя при этом измерения, затем мы вернулись к 933°, что позволило констатировать снижение значений величины K при той же температуре. Затем мы провели нагревание до 1365°;

был предметом многочисленных работ за последние годы. Ле-Шателье отметил (Bull. Soc. de phys., séance 20 april 1894), что магнитное превращение около 750° и изменение хода кривой около 860° соответственно относятся к превращениям Ar^2 и Ar^3 Осмонда и что превращение при 1280° соответствует изменению свойств железа, которые были уже раньше отмечены Боллем при 1300°, но существование которых оспаривается. (См.: F. Osmond. Transformation du fer et du carbone. 1888; E. Ball, Proc. of Iron a. Steel Inst., 1, 103, 1891).

резкое повышение значения K произошло между 1245 и 1295°. Начиная от 1300° и вплоть до 1365° величина K уменьшается. Измерения, произведенные во время охлаждения, показали, что K испытывает в обратном направлении те же изменения, что и во время нагревания. Кривые, относящиеся к нагреванию и охлаждению, вероятно, совпадали бы, если опыты не были бы нарушены медленным и неуклонным снижением значений K, которое, по-видимому, пропорционально времени и происходит постоянно, но причину этого мы не смогли понять.

Образец F был в хорошем состоянии к концу измерений, и вес его не изменился. Создавая совсем разные условия, мы все же хотим убедиться в том, что изменение, замеченное при 1280°, есть не что иное, как следствие какого-то вторичного действия, например цементации железа платиной, образования окисла, расстройства аппаратуры и т. п. С этой целью были проведены опыты с образцом G (точки *6*, отмеченные косыми крестиками на рис. 11). Этот образец был помещен в фарфоровую ампулу. Он был в шесть раз тяжелее образца F. Результаты опыта находятся в согласии с результатами, полученными для образца F. Численные значения величины K были почти такие же и приблизительно такова же была величина ее изменения вблизи 1280°. По случайным причинам опыты были прекращены, и нам не удалось проследить, что произошло бы при охлаждении.

Опыты с образцом железа F показали, что изменение при 1280° происходит резко. Опыты с образцом железа G, напротив, показали неуклонное увеличение K с температурой, однако это увеличение есть, очевидно, результат того, что температура куска железа G не была всюду одинаковой. Действительно, этот образец был довольно велик по своему объему и его наибольший размер был вертикален; он находился в большой фарфоровой ампуле, занимавшей много места в печи.

Вообще говоря, *у мягкого железа мы не обнаружили гистерезиса в соотношении, связующем интенсивность намагничения с температурой.*[40] Другими словами, значения, получаемые при каждой температуре для интенсивности намагничения, оказывались *почти* одними и теми же как при нагревании, так и во время охлаждения. Следует напомнить, что применяемые куски железа длительно прокаливались при 1200° и только потом вносились в магнитный прибор. Для подтверждения этого согласия результатов, получаемого при каждой температуре, сошлемся на четыре серии с образцом B при комнатной температуре и на две серии — при 688°. Для образца D значения, полученные при постепенном повышении температуры, согласуются со значениями, полученными при ее понижении.

Мы видим, что у образца F при температурах выше 1000° коэффициент намагничения непрерывно падал по ходу опытов.

---

[40] Сталь, напротив, обнаруживает очень заметно явления гистеризиса этого рода; Гопкинсон описал эти явления, существование которых я мог проверить.

Это не есть результат гистерезиса, а, скорее, результат своего рода *вязкости в действии теплоты*. Подобную вязкость, еще более значительную, мы еще раз заметили в другом образце;[41] образцы же B, D, F и G, напротив, не обнаружили ничего похожего. Здесь имеется какое-то противоречие, которое мы не в состоянии объяснить.

Свойства платинированного железа. С образцом D, который был платинирован, мы получили результаты, заметно отличающиеся от того, что было найдено у других образцов. Два первых превращения сближены почти до полного совмещения. Действительно, наибольшая скорость спадания величины K, которая, собственно говоря, и представляет собой магнитное превращение, наблюдается около 773° — вместо того чтобы подниматься около 750°, а быстрое понижение, которое у мягкого железа наблюдается между 860 и 900°, обнаруживается здесь между 817 и 860°. Железо находится здесь в состоянии, сравнимом со слабомагнитными телами между 915 и 1280° (рис. 13, *cd*); у платинированного железа это состояние простирается от 870 до 1290° (рис. 11).

Чугун

Я провел опыты с образцом очень нечистого *белого чугуна*.[42]

Главной моей целью было установить, какие возмущения вносит плавление в магнитные свойства. Чугун помещался в фарфоровую ампулу. Результаты наблюдений приведены в табл. XIX, на рис. 13 (точки, отмеченные косыми крестиками) и на рис. 11, кривая *5*, черные кружки.

Таблица XIX

Чугун

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
717°	400.0	1186°	26.2
780	51.6	1230	25.1
858	34.0	1267	24.5
932	32.2		
972	31.2	1254	25.1
981	31.0	1183	26.7
1110	28.6		

По-видимому, плавление не оказывает никакого влияния; температура магнитного превращения имеет место около 670° при температуре более низкой, чем у мягкого железа. Второго превращения мягкого железа здесь нет. От 930 до 1270° результаты очень близки к тому, что дает железо. Между 850 и 1267° результаты приближенно могут быть представлены в логарифмических координатах прямой линией с угловым коэффициентом, равным (—1).[43]

---

[41] Мы не приводим результатов, полученных с этим образцом, так как случайность помешала нам провести полную серию измерений.

[42] Я не проводил количественного анализа. Этот образец чугуна содержал большое количество графитированного углерода, много фосфора, много серы, немного мышьяка.

[43] Жирная линия, проведенная внизу рис. 11, указывает направление прямых с угловым коэффициентом, равным (—1).

Тогда будем иметь

$$10^6 \cdot K_t = \frac{38\,500}{T}.$$

Мы видим, что белый чугун подобен слабомагнитному телу в бо́льшем интервале температур, чем мягкое железо. Присутствие углерода способствует, однако, удержанию железа и при более низких температурах в том же состоянии, в котором оно находится между 930 и 1280°.

Таблица XX

Никель

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
373°	3650.0	531°	37.6
384	802.0	626	22.6
392	665.0	724	16.5
410	200.0	806	13.2
445	97.0		

Никель

Температура магнитного превращения никеля близка к 340°; мы исследовали это тело между 373 и 806°. Коэффициент намагничения при этом оказался независящим от интенсивности поля. Он закономерно и очень быстро уменьшается при повышении температуры. Никель был заключен в платиновую трубку. Полученные результаты приведены в табл. XX и на рис. 13.

Таблица XXI

Магнетит

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
550°	362.0	959°	22.9
564	159.6	1041	21.0
586	92.7	1130	20.3
616	63.4		
658	46.6	802	28.1
804	30.9	1130	18.8
		1218	16.1
566	166.0		
550	376.0	616	59.6
542	822.0 (?)	945	22.4
540	1500.0 (?)	1187	19.4
		1284	18.2
615	60.7	1322	17.5
803	27.8	1349	16.5
875	26.0	1369	15.3

Магнетит

Магнетит (магнитный железняк Fe_3O_4) есть ферромагнитное тело, более всего пригодное для полного изучения магнитных свойств выше температуры превращения. Это стойкое вещество, которое можно нагревать до очень высоких температур в платиновых ампулах, не изменяя его. Три образца, с которыми были проведены эксперименты, были вырезаны из одного и того же кристалла октаэдрического магнетита (из Эссекса, Соединенные Штаты). Температура плавления оказалась 1377°. Температура магнитного превращения лежит около 535°. Между 550 и 370° коэффициент намагничения независим от поля и очень закономерно убывает при повышении температуры.

Измерения, относящиеся к трем образцам, представлены соответственно данными табл. XXI, XXII и XXIII и кривыми рисунков 11 и 13.

Результаты, полученные с первыми двумя образцами, представлены кривой *1* на рис. 11 (черные кружки и косой крестик). Результаты же, полученные с третьим образцом, были несколько выше, и они представлены

Таблица XXII

Магнетит

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
562°	315.0 (?)	823°	24.9 (?)
621	59.8	837	24.5
788	29.7	1209	18.6
1003	22.5	1277	17.4
1268	18.5	1341	17.2
842	24.4		

Таблица XXIII

Магнетит

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
839°	27.2	1326°	18.8
865	26.9	1341	18.9
1209	20.0	1375	17.6 (?)

кривой *2* и значками ⊙.

Мы видим, что при температурах выше 850° результаты, представленные в логарифмических координатах, удовлетворительно изображаются прямой (—1), т. е., что при этих высоких температурах, подобно железу, магнетит ведет себя как слабомагнитное тело, как кислород. *Коэффициент намагничения магнетита между 850 и 1360° изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре.* Это есть, по-видимому, некоторый предельный закон, к которому стремится коэффициент намагничения магнетита при повышении температуры. Этот закон оправдывается с точностью, сравнимой с погрешностями опытов, которые, по правде говоря, мало точны при этих температурах (рис. 11). Между 850 и 1360° имеем

$$K \cdot 10^6 = \frac{28000}{T}.$$

Таблица XXIV

Магнетит

θ	$K \cdot 10^6$	θ	$K \cdot 10^6$
536°	10000.0 (?)	660	45.6
540	11500.0 (?)	700	38.7
542	822.0 (?)	760	31.7
550	369.0	800	28.4
565	162.8	900	24.3
586	92.7	1000	22.0
615	62.5	1200	19.3
630	54.8	1350	17.3

Табл. XXIV была составлена для представления магнитных свойств магнетита по всей совокупности наших измерений.

Мне очень хотелось бы установить, изменяется ли коэффициент намагничения в момент плавления. Все попытки, предпринятые с этой целью, остались бесплодными, и при достижении температуры плавления 1377° какие-нибудь случайности каждый раз прерывали опыты. В последней серии опытов температура случайно поднялась выше 1400°, фарфоровая печь раздулась и расплавилась, превратив в своего рода шлак все содержимое.

Заключение

Абсолютные измерения. Наш прибор не был специально приспособлен для абсолютных измерений. Мы думаем, что абсолютные измерения, проведенные с водой и висмутом, имеют погрешность 3%. Для удельного коэффициента намагничения K воды мы нашли $K \cdot 10^6 = -0.79$, и висмута $(-K \cdot 10^6) = 1.35$.[44]

Таблица XXV

	$t°$	$10^6 \cdot K$
Висмут твердый	20	—1.35
	273	—0.957
Висмут жидкий	От 273 до 405	—0.038
Сурьма, полученная электролитически	20	—0.68
» твердая	540	—0.47
» при комнатной температуре после нагревания до 535°	20	—0.94
Фосфор обыкновенный, твердый или жидкий	От 19 до 71	—0.92
Фосфор красный (грубо приближенное значение)	От 20 до 189	—0.73
Вода	От 15 до 189	—0.79
Каменная соль	От 16 до 455	—0.580
Хлористый калий	От 18 до 465	—0.55
Сернокислый калий	От 17 до 460	—0.43
Азотнокислый калий, твердый или жидкий (плавление при 350°)	От 18 до 420	—0.330
Кварц параллельно или нормально оси	От 18 до 430	—0.441
Сера октаэдрическая, призматическая в серном цвете, твердая или жидкая	От 15 до 225	— 0.51
Селен твердый или жидкий	От 20 до 200	—0.320
	От 240 до 415	—0.307
Теллур	От 20 до 305	—0.311
Бром	20	—0.41
Йод твердый или жидкий (плавление при 104°)	От 18 до 164	—0.385
Палладий	20	+5.3
	1370	+0.87
Воздух	20	+26.7
Кислород	20	+115.0
	452	+46.5
Железо поле в 1300 единиц	20	+166000.0
Железо поле в 25 единиц	20	+5440000.0
Железо поле от 25 до 1300 единиц	1000	+27.6

[44] Измерения Квинке, давшие для воды $K \cdot 10^6 = -0.815$, и измерения Дюбуа, давшие для воды $K \cdot 10^6 = -0.837$, а также измерения Эттингаузена, давшие для висмута $K \cdot 10^6 = -1.38$, имеют, я думаю, такую же погрешность, что и наши измерения. Было бы очень полезно получить хорошее абсолютное значение для воды с помощью более прямого метода. Метод, на который указывает Гуи (G. Gouy, C. r., 109, 985, 1889), использующий очень чувствительные весы, дал бы, я полагаю, прекрасные результаты.

Другие измерения, которые можно считать относительными по отношению к воде, приводят к абсолютным значениям, если принять для воды $K \cdot 10^6 = -0.79$.

Численные результаты. Табл. XXV содержит удельные коэффициенты намагничения различных тел при разных температурах и для полей от 25 до 1350 единиц.

Коэффициент намагничения *висмута* изменяется в зависимости от температуры θ между 15° и его температурой плавления 273° по некоторому линейному закону; между этими пределами температуры мы имеем

$$10^6 \cdot K_\theta = -1.35\,[1 - 0.00115\,(\theta - 20)].$$

Удельный коэффициент намагничения *слабомагнитных тел* при разных температурах выражается формулой

$$10^6 \cdot K_t = \frac{A}{T},$$

где A — некоторая постоянная, T — абсолютная температура. Этот закон хорошо подтверждается у следующих тел:

Кислород между 15 и 452°, при $A = 33\,700$
Палладий между 20 и 1370°, при $A = 1520$
Сульфат закиси железа (раствор), между 12 и 108°, при $A = 2400$
Хлористое железо, $FeCl_2$ и $FeCl_3$, *сульфат никеля*, *азотнокислый кобальт*, *железосинеродистый калий*, *сульфат марганца*, растворенные в воде (согласно опытам Видеманна и Плесснера) между 12 и 70°
Сульфат марганца и сульфат кобальта в сухом состоянии (согласно Плесснеру) между 12 и 60°.
Магнетит, между 850 и 1360°, при $A = 28\,000$
Белый чугун, между 850 и 1267°, при $A = 38\,500$
Железо,[45] между 930 и 1280°, при $A = \{$от 34 000 до 37 000

Для полного представления наших результатов к предыдущим данным надо присоединить: табл. XVII и XVIII, которые подытоживают наши опыты с *мягким железом* (стр. 177 и 181); табл. XIX, относящуюся к *чугуну* (стр. 186); табл. XX, относящуюся к *никелю* (стр. 187); табл. XXIV, подытоживающую наши опыты с *магнетитом* (стр. 188).

Сравнение магнитных свойств изученных тел. Удельный коэффициент намагничения диамагнитных тел не зависит от силы поля. Он, вообще

[45] Образец G (между 1015 и 1182°) хорошо следует этому закону; для образцов E и F между 930 и 1280° результаты в общих чертах передаются этой формулой, но в действительности закон изменения менее быстрый.

говоря, не зависит также и от температуры: это имеет место у воды, каменной соли, хлористого калия, сернокислого калия, азотнокислого калия кварца, серы, селена, теллура, йода, ртути, фосфора, расплавленного висмута. Можно по крайней мере сказать, что коэффициент изменения коэффициента намагничения этих тел очень мал, например, порядка величины коэффициента расширения твердых тел.

Сурьма и висмут представляют собой исключение из этого правила; коэффициент намагничения этих тел довольно быстро уменьшается по абсолютной величине при увеличении температуры. У *висмута*, который был специально исследован, *этот закон изменения линейный*.

Изменения физического или химического состояния часто оказывают лишь ничтожное влияние на диамагнитные свойства; это показывает, что эти свойства зависят только от состояния последних мельчайших частиц материи и не зависят от их расположения. Как на неоказывающие влияния явления, укажем: плавление азотнокислого калия при 350°, плавление белого фосфора при 44°, йода при 104°, то же серы; различные превращения, которые испытывает сера при нагревании, изменения аллотропического состояния, например превращение призматической серы и серного цвета в октаэдрическую серу. Однако не всегда бывает так: коэффициент намагничения селена, по-видимому, при плавлении уменьшается по абсолютной величине на 3—4%; коэффициент намагничения белого фосфора при превращении его в красный фосфор испытывает более значительное уменьшение; сурьма при электролизе переходит в аллотропическое состояние, которое значительно менее диамагнитно, чем ее обычная разновидность; наконец, *коэффициент намагничения висмута становится при плавлении в 25 раз меньше.*

Слабомагнитные тела также имеют независящий от силы поля коэффициент намагничения; однако эти тела ведут себя совершенно иначе с точки зрения изменений, производимых температурой. Закон изменения коэффициента намагничения имеет гиперболический ход и чаще всего *удельный коэффициент намагничения изменяется просто обратно пропорционально абсолютной температуре.*

Это имеет место, по крайней мере в первом приближении, у кислорода, у палладия, у растворенных и сухих магнитных солей.

Различие влияния температуры на коэффициент намагничения магнитных и диамагнитных тел очень значительно, и *эти результаты говорят в пользу теорий, приписывающих магнетизм и диамагнетизм причинам разной природы.*[46]

---

[46] Если эти причины разной природы накладываются друг на друга в одном и том же теле, то можно предполагать найти закон изменения с температурой в виде

$$K_t = \frac{A}{T} - K_1,$$

Свойства ферромагнитных и слабомагнитных тел, наоборот, между собой тесно связаны. *Всякое ферромагнитное тело при нагревании испытывает непрерывное превращение и приобретает свойства слабомагнитного тела.* Мы изучали у железа такое непрерывное превращение кривых $I=f(H)$, связывающих интенсивность намагничения с силой поля, начиная от комнатной температуры вплоть до 760°, т. е. той температуры, начиная с которой эти кривые становятся прямыми линиями, проходящими через начало для предельных значений применявшихся полей.

Когда повышают температуру ферромагнитного тела и когда его магнитные свойства претерпевают первое характерное быстрое снижение, соответствующее тому, что называется точкой магнитного превращения (снижение, которое имеет место около 745° у железа, около 530° у магнетита и около 340° у никеля), коэффициент намагничения не зависит от величины намагничивающего поля для полей ниже 1350 единиц. Однако значения этих коэффициентов намагничения остаются еще значительными, если сравнивать их с таковыми у слабомагнитных тел. При дальнейшем повышении температуры эти коэффициенты быстро падают. Возьмем в качестве типичного тела магнетит, который был исследован вплоть до 1370° и не обнаружил аномалий; мы видим, что коэффициент намагничения при нагревании от 850 до 1370° изменяется почти обратно абсолютной температуре; а это и есть закон, найденный для слабомагнитных тел. Кроме того, коэффициент намагничения магнетита при этом по порядку величины точно соответствует коэффициенту намагничения этих тел. Опыты с чугуном, никелем и даже с самим железом, [47] будучи надлежащим образом истолкованы, приводят к подтверждению общности предыдущих заключений. Таким образом, представляется *вероятным*, что при повышении температуры *закон обратной пропорциональности абсолютной температуре есть предельный закон, к которому стремится закон изменения удельного коэффициента намагничения ферромагнитных тел, когда их температура достаточно далека от температуры превращения.*

Аналогия между характером возрастания интенсивности намагничения какого-либо магнитного тела под действием температуры и силы

где A и K_1 суть две постоянные; K_1 — характеризует диамагнитные свойства, которые вообще не изменяются. Обычно магнитные свойства достаточно сильны, чтобы полностью замаскировать существование члена K_1; но это уже не имеет места у очень слабомагнитных тел, таких, например, как палладий, которому, по-видимому, соответствует закон изменения величины K, немного более быстрый, чем закон обратной пропорциональности абсолютной температуре.

[47] Кривая (рис. 13), представляющая в логарифмических координатах законы изменения коэффициентов намагничения кислорода, будучи продолженной, окажется приближенно пригодной для представления коэффициентов намагничения железа между 925 и 1280°. Если мы примем, что закон изменения кислорода между 15 и 450° выполняется при более высоких температурах, то отсюда следует, что между 925 и 1280° кислород и железо обладают почти одинаковыми удельными коэффициентами намагничения.

поля и характером возрастания плотности жидкости под влиянием температуры и давления. Существует подобие между функцией $f(I, H, T)=0$, относящейся к магнитным телам, и функцией $f(D, p, T)=0$, относящейся к текучим телам. Интенсивность намагничения I соответствует плотности D, сила поля H соответствует давлению p, абсолютная температура T играет одинаковую роль в обоих этих случаях. Для слабомагнитных тел или тел ферромагнитных при температуре, достаточно превышающей температуру превращения, имеем соотношение

$$I = A\frac{H}{T},$$

где A — некоторая постоянная. Точно так же для всякого текучего тела достаточно далеко от его температуры сжижения имеем соотношение

$$D = \frac{1 \cdot P}{RT},$$

где R — постоянная. Закон постоянства коэффициента намагничения при изменении поля и закон обратной пропорциональности абсолютной температуре для коэффициента намагничения суть законы, которые соответствуют законам Мариотта и Гей-Люссака.

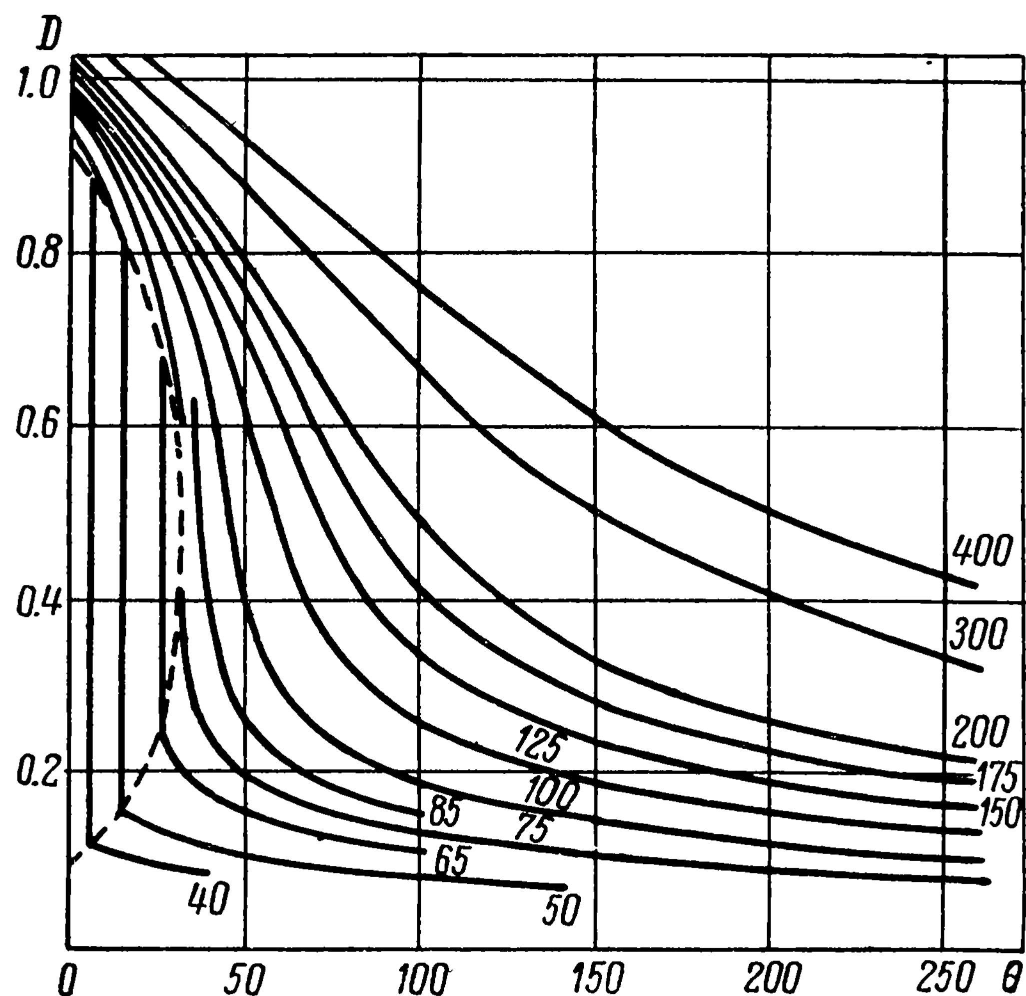


Рис. 14.

Характер изменения интенсивности намагничения в зависимости от температуры вблизи температуры превращения при постоянном поле напоминает характер изменения плотности жидкости в зависимости от температуры вблизи критической температуры (при постоянном давлении). Аналогия имеется между полученными нами кривыми $I=\varphi(T)$ и кривыми $D=\varphi(T)$, соответствующими критическим давлениям. Рис. 14, построенный по данным, определенным Амага для углекислоты, и рис. 15, построенный по моим опытам с железом, позволяют угадать эту аналогию.

Кривые на рис. 14 дают, по данным Амага, плотность углекислоты относительно воды в зависимости от температуры (между 0 и 258°); каждая кривая соответствует различным давлением в атмосферах, указанным на рисунке. Кривая сжижения проведена пунктиром. Кривые на рис. 15 изображают соотношение между интенсивностью намагничения и температурой у железа (между 730 и 780°) для поля в 50, 100, 300, 1000 и 1300 единиц.

Кривые $I=f(t)$, относящиеся к магнитным явлениям в железе для полей от 50 до 1300 единиц между 740 и 780°, аналогичны кривым $D=f(t)$, относящимся к плотности углекислоты между 0 и 258° для давлений от 75 до 200 атм.

Когда температура понижается, пучок кривых $I=f(t)$ для железа сужается между 750 и 740°, а затем, при температурах ниже 740°, этот пучок стремится вновь расшириться. Вообще у жидкостей, в пределах изученных до сих пор температур, пучок кривых $D=f(t)$ стремится непрерывно сузиться при понижении температуры. Однако у воды (опыты Амага) эти кривые сужаются только между 200 и 45°, а затем слегка расходятся друг от друга, когда температура понижается от 45 до 0°.

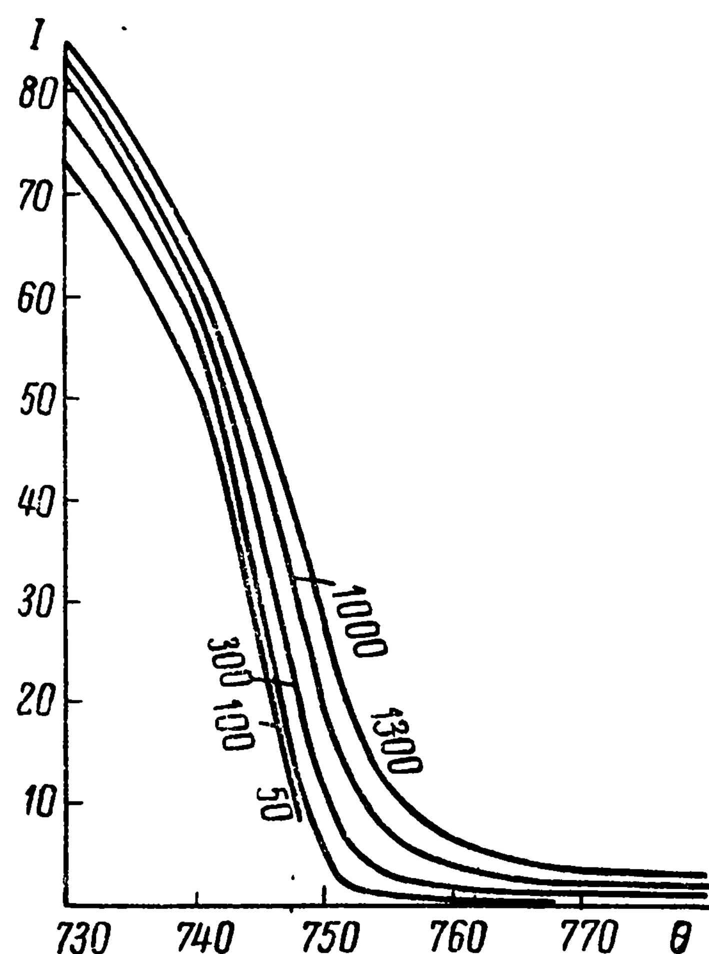


Рис. 15.

Такое сравнение может быть полезным, так как оно может подсказать некоторые новые опыты. Например, плотность жидкости увеличивается с понижением температуры тем резче, чем ниже давление. Когда давление ниже критического, такое сжатие происходит внезапно, и мы имеем тогда явление сжижения. Точно так же интенсивность намагничения возрастает тем резче при понижении температуры, чем слабее поле. Можно спросить себя, не будет ли это возрастание внезапным при достаточно слабом поле. Можно даже спросить себя, не существуют ли для магнитных явлений некоторая критическая точка, критические постоянные и т. п.

С более общей точки зрения можно полагать, что такие магнитные превращения, например как у железа при 745°, у магнетита при 530° и т. д., представляют собой явления, свойственные при некоторой определенной температуре всякому магнитному телу, подобно тому, как у жидкостей резкие сжатия в конце концов происходят всегда при их охлаждении при некоторой определенной температуре.

Наконец, с точки зрения молекулярных теорий можно было бы по аналогии с теми гипотезами, которые высказаны по отношению к текучим телам, утверждать, что быстрое увеличение интенсивности намагничения происходит тогда, когда интенсивность намагничения магнитных частиц достаточно велика для того, чтобы они могли реагировать друг с другом.

Я не думаю, однако, что следует преувеличивать важность аналогий между столь различными явлениями. Особенно не следует поддаваться ослеплению этими аналогиями до такой степени, чтобы не придавать значения тем характерным фактам, которые не согласуются с ними. Если,

например, сравнить кривые $I=\psi(H)$ с кривыми $D=\psi(p)$ при постоянной температуре, то сходство будет сомнительным.[48]

Так, например, *кривая стабильного намагничения*, о которой мы говорили раньше, не имеет аналогии в случае жидкостей, а эта кривая представляется мне имеющей большое значение, ибо именно она соответствует состоянию равновесия магнетизма.

Точки превращения железа. Помимо первой точки нормального магнитного превращения при 745°, имеющей подобные себе у всех ферромагнитных тел, наши опыты показали очень быстрый и аномальный спад магнитных свойств между 860 и 890°, а при 1280° — резкое увеличение коэффициента намагничения. Между 925 и 1280° железо представляет собой тело, сравнимое со слабомагнитными телами, такими, как кислород или палладий. Эти результаты кажутся мне благоприятными для теории Осмонда, которая считает, что выше 860° железо находится в некотором новом аллотропическом состоянии (железо β).[49]



[48] Сравнение будет более верным, если сказать, что аналогия имеется только между кривыми $I=\varphi(T)$ при постоянном H и кривым $D=\varphi(T)$ при постоянном p.

[49] Арнольд и Хадфильд полагают, что эти новые свойства железа выше 860° обязаны какому-то особому углеродистому соединению; железо никогда не бывает идеально чистым.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

XIV

О НОВОМ РАДИОАКТИВНОМ ВЕЩЕСТВЕ, СОДЕРЖАЩЕМСЯ В СМОЛЯНОЙ РУДЕ [1] [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ) [2]

Некоторые минералы, содержащие уран и торий (смоляная руда, халколит, уранит), очень активны в отношении испускания лучей Беккереля. Один из нас показал в предыдущей работе, что их активность даже превышает активность урана и тория, и высказал мнение, что это явление обусловлено каким-то другим весьма активным веществом, содержащимся в небольшом количестве в этих минералах. [2]

Изучение соединений урана и тория действительно показало, что эта способность испускать лучи, делающие воздух проводящим и действующие на фотографические пластинки, есть специфическое свойство урана и тория, обнаруживаемое во всех соединениях этих металлов и становящееся тем слабее, чем меньше относительное содержание активного металла в этих соединениях. Физическое состояние этих веществ, повидимому, имеет совершенно второстепенное значение. Различные опыты показали, что состояние смеси этих веществ сказывается только при изменении пропорции активных веществ и изменении поглощения, производимого инертными веществами. Некоторые причины (такие, например, как присутствие загрязнений), которые столь сильно влияют на фосфоресценцию или на флуоресценцию, здесь не оказывают никакого действия. Поэтому очень вероятно, что если некоторые минералы более активны, чем уран и торий, то это потому, что в них заключено какое-то вещество, более активное, чем эти металлы.

Мы попытались выделить это вещество из смоляной руды, опыты подтвердили эти предположения.

---

[1] Эта работа была проведена в Муниципальной школе промышленной физики и химии. Мы особенно благодарны г-ну Бемонту, руководителю практических занятий по химии, за его советы и помощь, которую он любезно нам оказывал.

[2] M. Sklodowska-Curie, C. r., 126, 1101, 1898.

Наши химические изыскания постоянно сопровождались контролем излучательной активности продуктов, отделяемых при каждой операции. Каждый такой продукт помещался на одну из пластин конденсатора и затем посредством электрометра и пьезоэлектрического кварца, как это было в указанной выше работе, измеряли приобретаемую воздухом проводимость. Таким путем мы получали не только качественные показания, но и числовые значения, которые позволяли оценить содержание активного вещества в этом продукте. Смоляная руда, которую мы исследовали в нашем приборе с пластинами, была приблизительно в 2,5 раза более активна, чем уран. Мы на нее воздействовали также кислотами и полученную жидкость обрабатывали сероводородом. Уран и торий остались в этой жидкости. Мы пришли к следующим результатам.

Осажденные сернистые соединения одновременно со свинцом, висмутом, медью, мышьяком и сурьмой содержали какое-то очень активное вещество.

Это вещество совершенно нерастворимо в сернистом аммонии, который отделяет его от мышьяка и сурьмы.

Те сернистые соединения, которые нерастворимы в сернистом аммонии, растворялись в азотной кислоте, а активное вещество, хотя и не полностью, можно было отделить серной кислотой от свинца. Отделяя сернокислый свинец, разведенный серной кислотой, удается в значительной части растворить активное вещество, уносимое сернокислым свинцом.

Активное вещество, находящееся в растворе вместе с висмутом и медью, полностью осаждается аммиаком, который отделяет его от меди.

В конце концов активное вещество остается вместе с висмутом.

Мы пока еще не нашли какого-либо надежного способа отделения в жидкости активного вещества от висмута. Однако нам удалось осуществить неполное разделение, основанное на следующих фактах.

При растворении сернистых соединений в азотной кислоте более легко растворяемые части менее активны.

При осаждении солей в воде первые осаждаемые порции значительно более активны.

Мы наблюдали, что при нагревании смоляной руды продукты возгонки получаются очень активные. Это наблюдение привело нас к способу разделения, основанному на различии летучести активного сернистого соединения и сернистого висмута. Мы нагревали эти сернистые соединения в откачанной трубке богемского стекла до 700°. Активное сернистое соединение отлагалось в виде черного налета в той части трубки, которая находилась при 250—300°, в то время как сернистый висмут оставался в более горячих областях.

Произведя такого рода различные операции, мы получали все более и более активные продукты. В конце концов мы получили вещество,

активность которого была приблизительно в 400 раз выше активности урана.

Мы исследовали, не являются ли активными многие известные в настоящее время тела. Мы проверили соединения почти всех простых тел; благодаря любезности многих химиков мы имели образцы самых редких веществ. Только уран и торий явно активны, может быть, тантал также активен в очень слабой степени.

Мы, однако, полагаем, что то вещество, которое мы извлекли из смоляной руды, содержит какой-то металл, до сих пор еще не замеченный, по своим аналитическим свойствам близкий к висмуту. Если существование этого нового металла подтвердится, мы предлагаем назвать его *полонием*, по названию страны, из которой один из нас родом.

Г-н Демарсэ любезно согласился посмотреть спектр тел, нами изученных. Ему не удалось обнаружить какие-либо характерные линии, помимо тех, которые обусловлены разными загрязнениями. Это обстоятельство не благоприятствует предположению о существовании какого-то нового металла. Однако г-н Демарсэ обратил наше внимание на то, что уран, торий и тантал дают своеобразные спектры, состоящие из бесчисленного множества очень тонких, трудно различаемых линий. [3]

Позволим себе заметить, что, если существование нового простого вещества подтвердится, то это открытие будет обязано исключительно только тому новому способу исследования, которое нам дали лучи Беккереля.



---

[3] Особенности этих трех спектров описаны в прекрасной публикации Демарсэ (D é m a r ç a y. Spectres électrique. Paris, 1895).

XV

ОБ ОДНОМ НОВОМ СИЛЬНО РАДИОАКТИВНОМ ВЕЩЕСТВЕ, СОДЕРЖАЩЕМСЯ В СМОЛЯНОЙ РУДЕ [1] [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ И Ж. БЕМОНОМ) [2]

Двое из нас показали, что с помощью чисто химических методов из смоляной руды можно извлечь сильно радиоактивное вещество. Это вещество по своим аналитическим свойствам близко к висмуту. Мы высказали мнение, что, может быть, смоляная руда содержит новый элемент, который мы предложили назвать *полонием*. [2]

Исследования, которые мы в настоящее время проводим, согласуются с ранее полученными результатами, однако в ходе этих исследований мы обнаружили второе сильно радиоактивное вещество, по своим химическим свойствам совершенно отличное от первого. В самом деле, полоний осаждается из кислотного раствора сероводородом; его соли растворимы в кислотах, и вода осаждает их из этих растворов; полоний полностью осаждается аммиаком.

Новое же химическое вещество, которое мы нашли, имеет все химические признаки чистого бария: оно не осаждается ни сероводородом, ни сернокислым аммонием, ни аммиаком; его сернокислая соль нерастворима в воде и в кислотах; его углекислая соль нерастворима в воде; хлористое соединение, хорошо растворимое в воде, нерастворимо в концентрированной соляной кислоте и в алкоголе. Наконец, это вещество дает легко распознаваемый спектр бария.

Мы, тем не менее, полагаем, что это вещество, хотя и состоит в своей главной части из бария, содержит, кроме того, некоторый новый элемент, сообщающий ему свойство радиоактивности и очень близкий к барию по своим химическим свойствам.

Вот те соображения, которые говорят в пользу такой точки зрения:

---

[1] Эта работа была выполнена в Муниципальной школе промышленной физики и химии.

[2] P. Curie, M. Curie, C. r., **127**, 175, 1898 (см. также: Oeuvres de P. Curie, Paris, 335, 1908; наст. издание, стр. 199).

1. Барий и его соединения обычно не радиоактивны; один из нас показал, что радиоактивность представляет собой, по-видимому, свойство атома, сохраняющееся во всех химических и физических состояниях вещества. [3] При такой точке зрения радиоактивность нашего вещества, не будучи обусловлена барием, должна быть приписана какому-то другому элементу.

2. Вещества, которые мы первоначально получили, представляли собой гидратированное хлористое соединение, радиоактивность которого в 60 раз сильнее, чем радиоактивность металлического урана (степень радиоактивности оценивалась величиной проводимости воздуха в нашем приборе с пластинами). Растворяя эти хлористые соединения в воде и осаждая часть их алкоголем, мы обнаружили, что осажденная часть гораздо более активна, чем часть, оставшаяся в растворе. Основываясь на этом обстоятельстве, можно было провести серию фракционирований, позволивших получать все более и более активные хлористые соединения. Таким путем мы получили хлористое соединение, имеющее активность в 900 раз большую, чем у урана. Мы принуждены были остановиться из-за нехватки исходного материала, но после проведения этих операций можно было предвидеть, что активность возросла бы еще сильнее, если бы мы могли продолжать наши операции. Эти факты могут объясняться присутствием некоторого радиоактивного элемента, хлористое соединение которого менее растворимо в воде, содержащей алкоголь, чем такое же соединение бария.

3. Г-н Демарсэ любезно согласился проверить спектр нашего вещества, за что мы его очень благодарим. Результаты его проверки представлены в отдельной заметке, следующей за нашей [[3]]. Демарсэ нашел в спектре линию, которая, по-видимому, не принадлежит ни одному из известных элементов. Эта линия, едва видимая у хлористого соединения, активность которого в 60 раз выше, чем у урана, становится заметной у хлористого соединения, обогащенного фракционированием до активности, превышающей в 900 раз активность урана. Интенсивность этой линии, таким образом, растет одновременно с увеличением радиоактивности, и поэтому, как мы думаем, имеются очень серьезные основания приписать ее радиоактивной части нашего вещества.

Перечисленные нами доводы заставляют нас думать, что это новое радиоактивное вещество содержит какой-то новый элемент, который мы предлагаем назвать *радием*.

Мы определили атомный вес нашего активного бария по дозировке хлора в безводном хлориде. Найденные нами величины очень мало отличаются от таковых, полученных параллельно с неактивным хлористым барием; хотя эти числа для активного бария всегда были немножко выше, но разница была порядка величины ошибок опыта.

---

[3] M. Curie, C. r., **126**, 1101, 1898.

Новое радиоактивное вещество несомненно содержит очень большую долю бария; несмотря на это, его радиоактивность значительна. Поэтому радиоактивность радия должна быть огромной.

Уран, торий, полоний, радий и их соединения делают воздух проводящим электричество и производят фотографические действия на чувствительные пластинки. В этих двух отношениях полоний и радий значительно более активны, чем уран и торий.

Четкие следы на фотографических пластинках получаются с радием и полонием за полуминутные экспозиции; чтобы получить такой же результат с ураном или торием, требуется несколько часов.

Лучи, испускаемые соединениями полония и радия, вызывают флуоресценцию платиносинеродистого бария, их действие в этом отношении подобно действию лучей Рентгена, однако значительно слабее. Для проведения такого опыта на активное вещество кладут очень тонкий листок алюминия, на котором намазан тонкий слой платиносинеродистого бария; в темноте этот слой кажется слабо светящимся со стороны активного вещества.

Таким образом, осуществлен источник света, правда очень слабый, но действующий без постороннего источника энергии. Здесь имеется противоречие, вероятно кажущееся, с принципом Карно.

В таких же условиях уран и торий не дают никакого свечения; их действие, вероятно, слишком слабое.[4]



[4] Мы позволим себе выразить здесь нашу благодарность г-ну Зюссу, члену-корреспонденту Института, профессору Венского университета. Благодаря его благосклонному посредничеству мы получили от австрийского правительства даром 100 кг отходов от обработки смоляной руды из Иоахимсталя, не содержащих больше урана, но содержащих полоний и радий. Этот подарок сильно облегчил наши исследования.

XVI

О РАДИОАКТИВНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМОЙ ЛУЧАМИ БЕККЕРЕЛЯ [1] [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ)

Изучая свойства приготовленных нами препаратов сильно радиоактивных веществ (полония и радия), мы установили, что лучи, испускаемые этими веществами, действуя на неактивные вещества, способны сообщить им радиоактивность и что эта наведенная радиоактивность сохраняется в течение достаточно долгого времени [2].

Вот как мы проводили наши опыты. Радиоактивное вещество в виде порошка находилось на горизонтальной пластинке; сверху, на расстоянии нескольких миллиметров, мы помещали исследуемую пластинку, поддерживаемую планкой. Время от времени мы снимали верхнюю пластинку и быстро переносили ее в электрометр и определяли ее радиоактивность по той проводимости, которую она сообщала воздуху.[2]

Таким путем мы установили, что экспонированная пластинка приобретает радиоактивность, возрастающую с увеличением времени экспозиции; однако по прошествии нескольких часов это возрастание становится очень медленным и наведенная радиоактивность, по-видимому, стремится к некоторому пределу.

Если удалить эту активированную пластинку от влияния радиоактивного вещества, то она остается радиоактивной в течение нескольких дней. Но эта наведенная радиоактивность уменьшается сперва очень быстро, затем все медленней и медленней и стремится исчезнуть по некоторому асимптотическому закону.

Чтобы наблюдать это явление, необходимо пользоваться сильно радиоактивными веществами. Мы проводили наши опыты с веществами от 5000 до 50 000 раз более активными, чем уран; наведенные активности,

---

[1] Эта работа была проведена в Муниципальной школе промышленной физики и химии.

[2] C. r., 126, 1101, 1898; Revue générale des Sciences, 30 janvieri, 1899.

наблюденные непосредственно после облучения, были от 1 до 50 раз выше активности урана.[3]

Эта активность падала до $\frac{1}{10}$ первоначальной величины после 2—3 час. с момента прекращения облучения.

Мы изучали также действие лучей Беккереля на различные вещества: цинк, алюминий, латунь, свинец, платину, висмут, никель, бумагу, углекислый барий, сернокислый висмут. Мы были очень удивлены, не найдя различия в порядке величины радиоактивности, наведенной в этих различных веществах, ведущих себя совершенно одинаковым образом.

Целью настоящей работы было прежде всего исследовать, не вызвана ли наведенная радиоактивность следами радиоактивного вещества, которое в виде паров или пыли перешло на облучаемую пластинку. Нечто аналогичное наблюдается в некоторых веществах, и это, по-видимому, является благоприятным для такого предположения. Однако мы имеем основание утверждать, что это не так и что действительно существует *наведенная радиоактивность* [3].

Постепенное и закономерное спадание наведенной активности, когда чувствительная пластинка находится в покое, по-видимому, исключает гипотезу о нелетучей пыли, и также трудно допустить, что соли бария, содержащего радий, летучи. Промывание в воде пластинки, подвергнутой действию хлористого бария, содержащего радий, не повлекло за собой исчезновения ее активности, несмотря на то что эта соль растворима.

Наконец, мы осуществили со всей возможной тщательностью один эксперимент, представляющийся нам решающим.

Мы поместили сильно радиоактивное вещество (в 50 000 раз более активное, чем уран) в металлическую герметически закрывающуюся коробку, дно которой было закрыто очень тонким слоем алюминия. Пластинки, находящиеся в контакте с дном коробки, становились радиоактивными; наблюдавшаяся наведенная радиоактивность была в 10—17 раз больше, чем у урана.

Мы получили очень интенсивное действие наведенной радиоактивности, помещая облучающее вещество непосредственно на облучаемую пластинку. В качестве облучающего вещества мы пользовались хлористым барием, содержащим радий, всякие следы которого мы могли удалять промыванием в воде. Нам таким путем удалось получить наведенную радиоактивность в несколько раз более сильную, чем активность урана.

---

[3] Некоторые образцы хлористого бария, содержащего радий, обнаруживали наведенную активность с очень изменчивой интенсивностью, тогда как собственная активность этих образцов во время опытов заметно не изменялась. Такая нерегулярность находится, по-видимому, в связи с изменениями температуры помещения и гигрометрического состояния воздуха; этот вопрос пока еще не разъяснен.

Явление наведенной радиоактивности представляет собой один из видов вторичного излучения, вызываемого лучами Беккереля. Конечно, это явление отлично от того, что мы знаем для лучей Рентгена. Действительно, изученные до сих пор вторичные лучи Рентгена возникают сразу в тот момент, когда тело, их излучающее, подвергается действию лучей Рентгена, и исчезают также внезапно с прекращением последних.

Перед лицом тех фактов, которые мы здесь изложили, можно спросить себя, не является ли радиоактивность, представляющаяся самопроизвольной, на самом деле для некоторых веществ наведенной.





XVII

ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ, ПРОИЗВОДИМЫЕ ЛУЧАМИ БЕККЕРЕЛЯ [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ)

Весьма активные лучи, испускаемые содержащими радий солями бария, способны превращать кислород в озон. Если хранить радиоактивную соль в закрытом флаконе, то, открыв его, ощущаем совершенно определенный запах озона. Это явление было обнаружено Демарсэ на весьма активном препарате хлористого бария, содержащем радий, который был ему переслан в маленьком закупоренном флаконе для спектроскопических исследований. После откупорки флакона запах озона частично рассеивается; чтобы восстановить его прежнюю интенсивность, достаточно закрыть флакон минут на десять.

Мы проверили выделение озона, применяя накрахмаленную бумагу, пропитанную йодистым калием; будучи помещена перед отверстием флакона, она слегка окрашивается. Окраска делается более темной, если привести в соприкосновение с бумагой хлористый барий, содержащий радий, тогда как обыкновенный хлористый барий при тех же условиях не производит никакого действия.

Соединения, содержащие радий и создающие озон, очень активны и все светятся. По-видимому, образование озона более непосредственно связано с радиоактивностью, чем со свечением. Так, например, углекислая соль радия, обладающая сильным свечением, производит меньше озона, чем много слабее светящийся, значительно более радиоактивный хлористый радий.

Мы обнаружили также окрашивающее действие лучей Беккереля на стекло. Если в течение некоторого времени хранить соль радия в стеклянном флаконе, то заметим фиолетовую окраску, которая постепенно распространяется от внутренней стороны стенки флакона к наружной.

В случае очень активных соединений по прошествии десяти дней дно флакона в месте соприкосновения с солью, если смотреть на него со стороны, представляется почти черным. Эта окраска ослабевает по мере углубле-

ния в толщу стекла; на расстоянии нескольких миллиметров от дна она становится фиолетовой. В случае менее активных соединений эта окраска менее интенсивна и требует большего времени для своего возникновения. Стекло флакона, в котором происходит это явление, не чернеет под действием восстановительного пламени, оно не имеет в своем составе свинца.

Те изменения, которые происходят в платиносинеродистом барии под действием лучей радия, вероятно, также представляют собой химическое явление. Под действием лучей радия платиносинеродистый барий начинает желтеть, затем становится коричневым; эта коричневая модификация менее чувствительна к возбуждению флюоресценции. Для восстановления платиносинеродистого бария достаточно его подвергнуть действию солнечного света. Это явление подобно тому, которое описано Вилларом [1] для случая лучей Рентгена.

Если поместить в темноте слой платиносинеродистого бария над слоем радиоактивной соли, прикрытой пластинкой алюминия, то этот платиносинеродистый барий начинает сильно светиться под действием лучей Беккереля; постепенно он переходит в коричневую модификацию, и свечение постепенно затухает. Если освещать эту систему, то платиносинеродистый барий частично восстанавливается; если после этого перенести систему в темноту, то испускаемое излучение снова становится очень ярким.

Мы, таким образом, осуществляем синтез фосфоресцирующего тела с длительной фосфоресценцией с помощью флуоресцирующего и радиоактивного тела.

Гизель получил платиносинеродистый барий, содержащий радий, ярко светящийся в момент приготовления; под действием собственных лучей Беккереля он превращается в коричневую, слабо светящуюся модификацию.[2]

Когда хлористый барий и радий выпадают в растворе, насыщенном при нагревании, то их кристаллы в момент осаждения бесцветны. Мало-помалу эти кристаллы принимают розовую окраску, все более и более резко выраженную. Эта окраска возникает тем быстрее и тем она интенсивнее, чем больше радия содержит соль. Если растворить розовые кристаллы, раствор будет бесцветный; если произвести кристаллизацию, то осаждающиеся из него кристаллы в начале будут также бесцветны. Появление окраски, по-видимому, сопровождает появление радиоактивности, которое после осаждения растет со временем.

Сухой хлористый барий, содержащий радий, совершенно белый; он постепенно желтеет, по мере того как растет его радиоактивность.

---

[1] Soc. de Phys., 18 mai 1898.

[2] F. G i e s e l, Wied. Ann., 69, 91, 1899.

Такое изменение окраски, вероятно, связано с некоторым молекулярным превращением, происходящим в радиоактивных солях бария, под влиянием лучей радия.

Превращение кислорода в озон требует затраты некоторой энергии. Получение озона под действием лучей, излучаемых радием, является доказательством того, что это излучение представляет собой непрерывное выделение энергии.

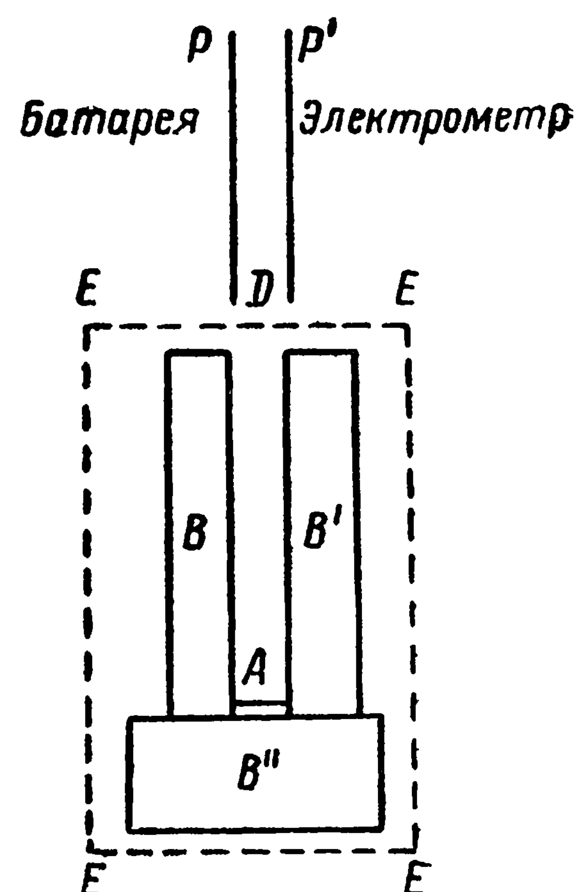


XVIII

ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЛУЧИ БЕККЕРЕЛЯ. ОТКЛОНЯЕМЫЕ И НЕОТКЛОНЯЕМЫЕ ЛУЧИ [1] [[1]]

Наиболее существенная неоднородность излучения радиоактивных тел обнаруживается при действии магнитного поля.[2]

Мейер и Швейдлер установили, что излучения бромистого бария, приготовленного Гизелем и содержащего радий и излучения углекислой соли, приготовленной нами, ведут себя в магнитном поле неодинаково.



Гизель наблюдал отклонение лучей полония в магнитном поле на свежеприготовленном образце, тогда как Беккерель у полония, приготовленном нами месяцем ранее, никакого отклонения не обнаружил.

Я исследовал действие магнитного поля на лучи Беккереля, пользуясь методом, позволившим производить количественные измерения.

Радиоактивное тело A (см. рисунок) посылает радиацию вдоль направления AD в промежуток между пластинками P и P'. Пластинка P поддерживается при потенциале 500 в; пластинка P' присоединена к электрометру и пьезоэлектрическому кварцу. Сила тока, протекающего в воздухе под влиянием радиации, измерялась с помощью кварца. По желанию можно было создавать электромагнитом магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка и заполняющее всю область $EEEE$.

---

[1] Эта работа была проведена в Муниципальной школе промышленной физики и химии.

[2] Отклонение лучей Беккереля в магнитном поле было установлено независимо и почти в одно и то же время Гизелем (F. Giesel, Wied. Ann., 69, 834, 1899), Мейером и Швейдлером (S. Meyer, V. v. Schweidler, Wien, Ber., 36, 3 и 9 novembre, 1899) и Беккерелем (H. Becquerel, C. r., 129, 997, 1205, 1899).

Даже если лучи отклоняются незначительно, они уже не могут проникнуть в пространство между пластинками, и ток прекращается. Область, через которую проходят лучи, ограничена массами свинца B, B' и B'' и сердечником электромагнита; когда лучи отклоняются, то они поглощаются свинцовыми массами B и B'.

Получаемые результаты существенно зависят от расстояния AD от излучающего тела A до входа в конденсатор D. Если это расстояние AD достаточно велико (больше 0.07 м), то все лучи радия, достигающие конденсатора, будут отклонены, и их действие прекращено полем в 2500 единиц. Если же расстояние AD меньше 0.065 м, то только часть лучей будет отклонена; эта часть будет полностью отклонена полем в 2500 единиц и доля исключенных лучей не будет возрастать, если увеличивать поле от 2500 до 7000 единиц.

Доля неотклоненных лучей тем больше, чем меньше расстояние AD между излучающим телом и конденсатором. Для небольших расстояний лучи, которые могут быть отклонены, составляют только незначительную часть всего излучения [2].

Приведем результаты, полученные для одного образца углекислого бария, содержащего радий.

В верхней строке указано расстояние AD в см. Если принять силу тока, получающуюся в отсутствии магнитного поля для каждого расстояния, за 100, то числа второй строки показывают значения силы тока, которые были обнаружены при включении поля. Эти числа можно рассматривать как процентное отношение неотклоненных лучей.

Расстояние	7.1	6.9	6.5	6.0	5.1	3.4
На 100 лучей не отклонено	0	0	11	33	56	74

Отклоненные лучи суть наиболее проникающие.

Если пропустить пучок через поглощающую пластинку (алюминий или черную бумагу), то прошедшие лучи все могут быть отклонены полем; таким образом, с помощью экрана и магнитного поля все излучение может быть поглощено в конденсаторе. Достаточно алюминиевой пластинки толщиной 0.01 мм, чтобы поглотить все неотклоняемые лучи, если только вещество находится достаточно далеко от конденсатора; чтобы получить тот же результат для меньших расстояний (0.034 и 0.051 м), необходимы две алюминиевые пластинки по 0.01 мм.

Я произвел подобные измерения с четырьмя веществами, содержащими радий (хлориды и карбонаты), очень разной активности; отношение активностей наиболее различающихся соединений составляло по крайней мере 300. Однако результаты получились весьма сходные. В высшей степени замечательно, что расстояние, на которое распространяются в воздухе неотклоняемые лучи, оказалось почти одним и тем же для всех этих четырех веществ. Оно было близко к 0.067 м. Но для наименее

активного вещества (которое еще в 200 раз активнее урана) это расстояние было, пожалуй, несколько меньше, а доля проникающих лучей, отклоняемых магнитом, значительно больше, чем у остальных.

Можно заметить, что у всех образцов проникающие и отклоняемые магнитом лучи составляют только малую часть всего излучения; когда мы используем полное излучение для создания проводимости воздуха, то они участвуют в этом только в малой степени.

Изученные мною соединения полония испускают только неотклоняемые лучи, как это уже нашел Беккерель. Если изменять расстояние AD от полония до конденсатора, то сперва, пока это расстояние достаточно велико, не наблюдается никакого тока; когда же мы приближаем полоний, то для некоторого определенного расстояния, которое для изученного образца было 0.04 м, излучение внезапно становится ощутимым с очень большой интенсивностью; если продолжать приближать полоний, то ток будет закономерно увеличиваться, но магнитное поле не вызывает никакого действия. Неотклоняемое излучение полония представляется как бы ограниченным в пространстве и с трудом выходящим в атмосферу за пределы некоторого подобия оболочки, окружающей это вещество на расстоянии в несколько сантиметров.

В излучении радия лучи, не отклоняемые полем, по-видимому, совершенно аналогичны лучам полония. Подобно последним, они являются слабопроникающими и занимают в воздухе некоторую ограниченную область вокруг вещества [3].

Полоний Гизеля испускает лучи, отклоняемые магнитным полем. Может быть, однако, это вещество существенно не отличается от нашего. Возможно, что свежеприготовленный полоний испускает отклоняемые лучи и что эти лучи исчезают первыми, когда активность вещества уменьшается.



XIX

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЗАРЯДЕ ОТКЛОНЯЕМЫХ ЛУЧЕЙ РАДИЯ [1] [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ)

Опыты Гизеля, Мейера и Швейдлера и Беккереля показали, что лучи радия отклоняются в магнитном поле подобно катодным лучам.[2] С другой стороны, мы обнаружили, что излучение радия состоит из двух совершенно различных групп лучей: лучей, отклоняемых в магнитном поле, и лучей, не отклоняемых в нем [3] [2].

Катодные же лучи, как это показал Перрен, заряжены отрицательным электричеством.[4] Более того, согласно опытам Перрена и Ленарда, они могут переносить свой заряд сквозь металлические оболочки, соединенные с землей и через изолирующие пластинки.[5] Во всех тех местах, где катодные лучи поглощаются, происходит непрерывное выделение отрицательного электричества. Мы установили то же самое для отклоняемых лучей радия. *Отклоняемые лучи радия заряжены отрицательным электричеством.*

Поместим радиоактивное вещество на одну из пластинок конденсатора, соединенную с землей; вторую пластинку соединим с электрометром; она получает и поглощает испускаемые лучи. Если эти лучи заряжены, то мы должны были бы наблюдать непрерывный приток электричества к электрометру. Такой опыт, проведенный в воздухе, не позволил нам обнаружить какой-либо заряд лучей; осуществленный таким путем опыт не был достаточно чувствительным. Воздух между пластинками становился проводящим, и электрометр уже не был достаточно изолирован и мог обнаруживать только достаточно большие заряды.

---

[1] Эта работа была выполнена в Муниципальной школе промышленной физики и химии.

[2] F. Giesel, Wied. Ann., 69, 834, 1899; S. Meyer, V. v. Schweidler, Phys. Zs., 1, 113, 1900; H. Becquerel, C. r., 129, 997, 1899.

[3] C. r., 130, 73, 76, 1897, 1900.

[4] C. r., 121, 1130, 1897; Ann. de chim. et de phys., (VII), 11, 433, 1897. — В опытах Перрена порядок зарядов был 10^{-6} кулона при разряде катушки.

[5] Ph. Lenard, Wied. Ann., 64, 279, 1898.

Чтобы неотклоняемые лучи не могли создавать каких-либо затруднений в ходе опыта, их можно было погасить, закрывая излучающий источник тонким металлическим экраном; результаты опыта при этом не изменялись.[6]

Мы безуспешно повторяли этот опыт в воздухе, заставляя лучи проникать внутрь цилиндра Фарадея, соединенного с электрометром.[7]

Уже на основании указанных опытов можно было бы заключить, что заряд примененных излучающих веществ значительно меньше заряда катодных лучей.

Для того чтобы установить существование слабого выделения электричества на проводнике, поглощающем лучи, надо защитить его от воздуха: либо помещая его в очень хорошо откачанную трубку, либо окружая его хорошим твердым диэлектриком. Мы пользовались последним способом.

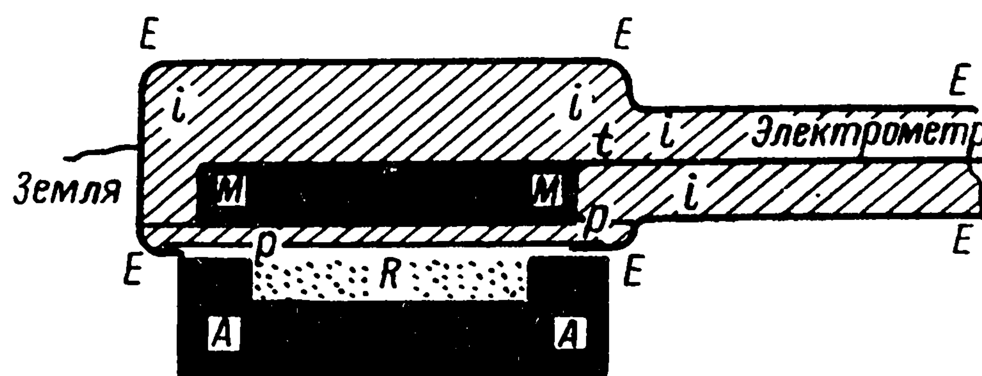


Рис. 1.

Проводящий диск MM (рис. 1) был соединен металлическим стержнем t с электрометром; диск и стержень были полностью окружены изолирующим материалом $iiii$; все это закрывалось металлической оболочкой EEE..., соединенной с землей. Слой изолятора pp и металлическая оболочка были очень тонкие у одной стороны диска. Именно эта сторона подвергалась действию излучения соли бария R, содержащей радий и помещенной снаружи в свинцовом корытце.[8]

Лучи, испускаемые радием, проходили сквозь наружную металлическую оболочку и сквозь слой изолятора pp и поглощались металлическим диском MM. Этот диск и является тем местом, где происходит непрерывное и постоянное выделение отрицательного электричества, обнаруживаемое электрометром и измеряемое с помощью пьезоэлектрического кварца.

---

[6] По правде говоря, в этих опытах всегда наблюдалось некоторое отклонение электрометра; легко установить, что это отклонение обусловлено контактной электродвижущей силой между пластинкой, соединенной с электрометром, и соседними проводниками; эта электродвижущая сила заряжает электрометр благодаря проводимости воздуха, подвергнутого действию излучения радия.

[7] Применение цилиндра Фарадея не необходимо, но оно дает некоторые преимущества в том случае, когда происходит сильное рассеяние лучей от ударов о стенки. Можно надеяться, что таким путем удастся захватить и использовать эти рассеянные лучи, если только таковые существуют.

[8] Изолирующая оболочка должна быть совершенно сплошная. Всякая трещина, содержащая воздух и простирающаяся от внутреннего проводника до металлической оболочки, окажется причиной возникновения тока, вызванного контактными электродвижущими силами и обусловленного проводимостью воздуха под влиянием действия радия.

Создаваемый таким путем ток очень слаб. Применяя очень активный хлористый барий, содержащий радий и образующий слой площадью 2.5 см^2 и толщиной 0.2 см, мы получали ток порядка 10^{-11} а (прежде чем лучи могли быть поглощены диском *ММ*, они проходили сквозь слой алюминия толщиной 0.01 мм и слой эбонита толщиной 0.3 мм).

В качестве материала диска *ММ* мы пользовались последовательно свинцом, медью и цинком, а в качестве изолятора — эбонитом и парафином; получающиеся при этом результаты были одними и теми же.

Сила тока уменьшалась, когда мы удаляли источник излучения *R* или когда мы применяли менее активное вещество.

Мы получили совершенно такие же результаты, когда диск *ММ* заменили цилиндром Фарадея, содержащим воздух и окруженным снаружи изолирующим веществом. Отверстие цилиндра, закрытое тонкой изолирующей пластинкой *pp*, было обращено к источнику излучения.

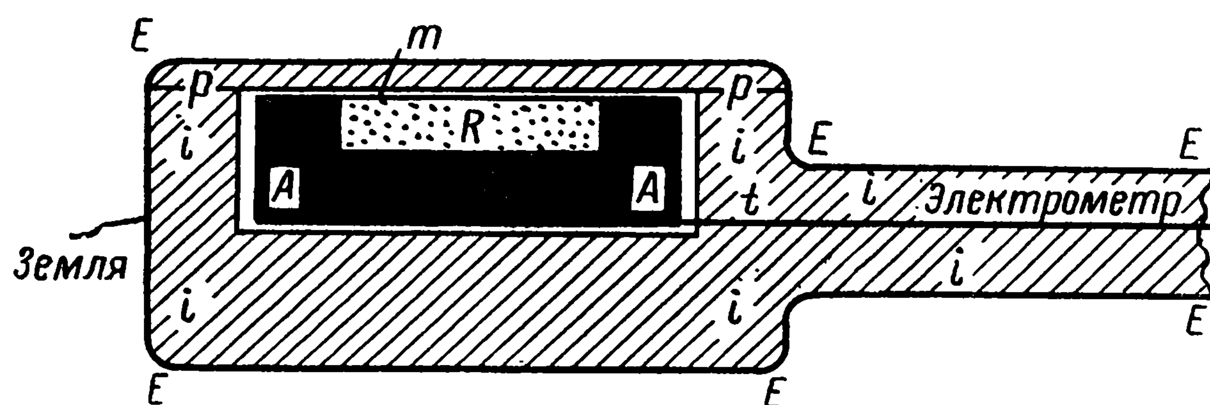


Рис. 2.

Наконец, мы поставили обратный опыт, помещая свинцовое корытце с радием внутрь изолирующей среды и соединяя его с электрометром (рис. 2). Все это было заключено в металлическую оболочку, соединенную с землей.

При этих условиях электрометр показывал, что радий приобретает положительный заряд, равный по величине отрицательному заряду в предыдущем опыте. Действительно, лучи радия проходят сквозь тонкую диэлектрическую пластинку *pp* и покидают внутренний проводник, унося с него отрицательное электричество.

Неотклоняемые лучи радия не принимают участия в описанных опытах, так как они поглощаются очень тонким слоем вещества. Метод, который только что был описан, не подходит для определения заряда лучей полония,так как эти лучи также очень слабопроникающие. Нам не удалось обнаружить никаких признаков заряда в опытах с полонием, испускающим только неотклоняемые лучи, однако на основании указанных выше соображений из этого опыта нельзя выводить каких-либо заключений.

Таким образом, так же как и в случае катодных лучей, отклоняемые лучи радия переносят электричество. Однако до сих пор не было известно существования электрических зарядов, не связанных с весомой материей. Мы вынуждены поэтому считать вполне правдоподобным утверждение, что радий представляет собой очаг непрерывного испускания отрицательно заряженных частиц материи, способных, не теряя заряда, проникать сквозь проводящие или диэлектрические экраны. Если отно-

шение электрического заряда к массе такое же, как при электролизе, то в предыдущих опытах радий теряет три эквивалента в мг в течение миллиона лет.

Очень надежно изолированный образец радия будет быстро самопроизвольно заряжаться до чрезвычайно высокого потенциала. Согласно баллистической гипотезе, потенциал будет увеличиваться до тех пор, пока не образуется поле, достаточно интенсивное для того, чтобы воспрепятствовать удалению испускаемых заряженных частиц.

Мы повторили с лучами Рентгена те опыты, которые составляют предмет настоящей заметки.

Полученные явления чрезвычайно слабы; из этих опытов мы можем только заключить, что если эти лучи заряжены, то в еще значительно меньшей степени, чем отклоняемые лучи радия.



XX

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЛУЧЕЙ, ИСПУСКАЕМЫХ ПРИ ТРАНСФОРМАЦИИ Х-ЛУЧЕЙ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. САНЬЯКОМ [2])

Слабая проникающая способность вторичных лучей от тяжелых металлов напоминает свойства катодных лучей Ленарда, которые сильно рассеиваются в воздухе, едва пробежав в нем только несколько сантиметров. Такая аналогия наводит на мысль исследовать, не несут ли эти вторичные лучи, сильно поглощаемые воздухом, отрицательные электрические заряды; ведь именно в этом состоит основное свойство катодных лучей. Отклонение этих лучей магнитным [1] или электрическим полем явилось бы вероятным следствием наличия в них заряда. Между этим предположением и тем, что раньше было высказано одним из нас, нет противоречий, так как пучок лучей, сомопроизвольно испускаемый *радием* супругов Кюри, представляет собой смесь лучей, заряженных отрицательно, подобно катодным лучам, отклоняемым магнитным и электрическим полями, и лучей неотклоняемых, подобных Х-лучам, лишенным электрического заряда [3].

Чтобы сначала уточнить, в какой мере в Х-лучах отсутствуют заряды, [2] мы воспользовались сосудом Фарадея с толстыми свинцовыми стенками, имеющим форму куба со стороной 23 см и соединенным с квадратным электрометром Кюри. Широкий пучок Х-лучей проникал через круглое отверстие диаметром 10 см, помещенное на расстоянии 7 см от фокусной пластинки трубки, создающей Х-лучи.

---

[1] P. Curie, G. Sagnac, C. r., **130**, 1013, 1900.

[2] Профессор Е. Дорн сообщил, что вторичные лучи от тяжелых металлов отклоняются магнитным полем, причем в том же направлении, что и катодные лучи (E. Dorn, Abh. d. Naturforsch. Ges. Halle, 22, 40, 1900).

Один из нас уже раньше высказал мнение, что *сильнопоглощаемые вторичные лучи тяжелых металлов могут содержать лучи, аналогичные лучам Ленарда, и, подобно им, отклоняемые магнитом.* (G. Sagnac. Recherches sur les transformations des rayons de Röntgen, Chap. I, § 3 (Rayons secondaires, rayons X et rayons de Lenard). L'Éclairage électrique, du 12 mars 1898).

Свинцовый сосуд с отверстием был полностью окружен сплошным слоем *твердого диэлектрика* (парафином или эбонитом), покрытым в свою очередь тонкой алюминиевой оболочкой, соединенной с землей. *Сплошной слой твердого диэлектрика необходим для того, чтобы сохранять полную изоляцию* цилиндра; без этой предосторожности он не был бы изолирован окружающим воздухом, становящимся проводником электричества под действием лучей Рентгена.

При таких условиях электрометр заметно не заряжался. Мы могли, таким образом, заключить, что если и принять гипотезу о заряженности X-лучей, то сила тока, эквивалентного движению электричества в примененном нами широком и интенсивном пучке X-лучей, несомненно меньше 10^{-12} а.

Мы можем, напротив, заключить о существовании отрицательной электризации вторичных лучей тяжелых металлов. При атмосферном давлении X-лучи и эти вторичные лучи сообщают воздуху такую проводимость, что металл, испускающий эти лучи, уже не оказывается изолированным; поэтому невозможно удержать электрические заряды вторичных лучей. В то же время надо устранить возможность того, чтобы вторичные лучи тяжелых металлов, часто очень мало проникающие, могли быть поглощены в непосредственной близости от испускающего их металла. Чтобы восстановить изолирующие свойства воздуха, несмотря на действие пронизывающих его лучей Рентгена и вторичных лучей, мы были вынуждены поместить эти металлы в разряженный воздух и работать, постепенно уменьшая давление, вплоть до Круксовой пустоты (0.001 мм рт. ст.).

Мы уменьшили до 3—4 мм слой разреженного воздуха между излучающим металлом и соседними металлическими стенками. В этом тонком слое сильно разреженного воздуха электродвижущая сила между излучающим металлом и окружающими его стенками под влиянием лучей вызывает ток, сила которого меньше $^1/_{100}$ тока, обусловленного отрицательным электричеством вторичных лучей металла, таких, как платина и свинец. Расположение приборов было следующее.

Тонкий металлический лист M (рис. 1), соединенный с квадрантным электрометром и пьезоэлектрическим кварцем Кюри, был укреплен на изоляторе внутри плоской металлической коробки $ABCD$ на расстоянии 3 мм от стенок. Эту коробку можно было соединить с землей. В нижней стенке CD коробки, изготовленной, так же как и верхняя AB, из толстой пластинки другого металла N, были прорезаны окошки f, покрытые тонким листом металла N. На 6 см ниже AB находилась пластинка l — источник лучей Рентгена. Вся система, создающая эти лучи (трубка R, катушка Румкорфа и электролитический прерыватель Венельта), заключена в большой ящик из толстого свинца, стенки PP которого соединены с землей. Рентгеновские лучи выходят из ящика PP через круглое отверстие диаметром 10 см, покрытое только тонким ли-

стком алюминия *aa*. В непроницаемой коробке *ABCD*, соединенной с ртутным насосом, можно было создавать Круксову пустоту.

Когда мы работали при атмосферном давлении, проводимость воздуха благодаря влиянию лучей была значительна. Если металл *M* внутреннего листка отличен от металла *N* окошек *f* и металла внутренних стенок коробки *ABCD*, то система $(M \mid N)$ действует как некоторый элемент, электродвижущая сила которого вызывает отклонение электрометра. Пользуясь методом обращения пьезоэлектрического кварца Жака

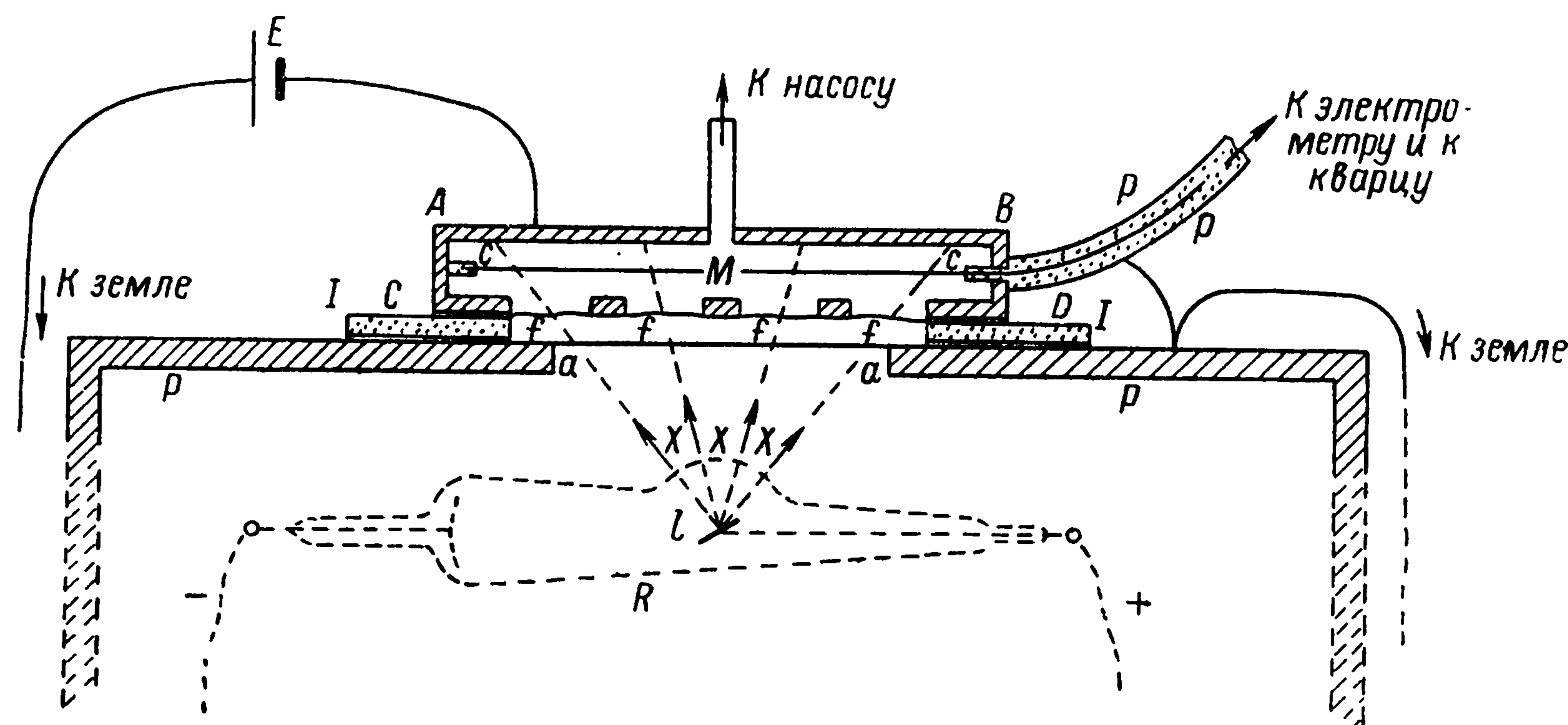


Рис. 1.

Кюри, можно было измерить электрический ток, необходимый для поддержания электрометра при нулевом потенциале; либо же можно было, не прибегая к кварцу, заставить электрометр оставаться при нуле, включив в *E* между коробкой *ABCD* и землей подходящую электродвижущую силу e_0, берущую на ответвление цепи 1 даниель.

Если при таких условиях произвести в приборе разрежение, то равновесие электрометра будет сначала сохраняться благодаря той же компенсирующей электродвижущей силе e_0, пока давление не снизится до величины порядка миллиметра (только ток, возникающий в отсутствие e_0, становится все более и более слабым). При более низких давлениях компенсирующая электродвижущая сила изменяется. Она вскоре превысит электродвижущую силу 1 даниеля, будет расти и представится увеличивающейся выше всякого предела по мере приближения к Круксовой пустоте. Если восстановить в *E* первоначальную электродвижущую силу e_0, которая компенсировала это явление при атмосферном давлении, то с помощью кварца можно измерить силу тока, необходимую для удержания электрометра при нуле. Этот ток, появляющийся при давлении порядка миллиметра, сперва слегка возрастает по мере разрежения, а затем при Круксовой пустоте становится почти постоянным.

Если, например, внутренним металлом M будет *платина*, а металлом N внутренних стенок коробки $ABCD$ — *алюминий*, то для получения компенсации при атмосферном давлении надо поддерживать алюминий при отрицательном потенциале (по абсолютной величине меньшем 1 даниеля).

При Круксовой пустоте такая электродвижущая сила уже более недостаточна, и для компенсации потребуется держать алюминий при отрицательном потенциале, по абсолютной величине равном приблизительно 30 в. Если поддерживать в цепи электродвижущую силу e_0, компенсирующую явление при атмосферном давлении, то можно констатировать, что при Круксовой пустоте под действием рентгеновских лучей платина будет заряжаться положительно. Если окошки f, покрытые тонким слоем алюминия, имеют площадь около 30 см^2 и расположены на расстоянии 6 см от источника l лучей Рентгена, то зарядный ток, измеренный с помощью кварца, имеет величину порядка 10^{-10} а.

Этот ток достаточно слаб, чтобы можно было сказать: пока мы имеем дело с неразреженным газом, вторичные лучи вызывают проводимость газа, освобождая равные количества положительного и отрицательного электричества. Но в разреженном газе проявляется влияние отрицательных зарядов вторичных лучей; тогда X-лучи разрежают отрицательные тела быстрее, чем тела положительные, или даже они увеличивают заряд положительных тел. Замечательно, что эта диссимметрия разряда, производимая *в пустоте* лучами Рентгена, падающими на какой-либо тяжелый металл, имеет тот же знак, что и диссимметрии разряда проводников, освещаемых ультрафиолетовыми лучами Герца и Гальвакса.

Мало отличающиеся от этого результаты были нами получены на установке, изображенной на рис. 2. Тонкий металлический лист M был свернут в цилиндр, а плоская коробка заменена вторым металлическим цилиндром $ABCD$, имеющим ту же ось, что и MM. Всю систему $MMABCD$ поместили в стеклянный сосуд V, соединенный с ртутным насосом, а сам сосуд V закрыли стеклянной крышкой V' и замазали замазкой. С этой второй установкой легче избежать проникновения воздуха, чем с первой.

Эти факты в крайнем случае могли бы быть объяснены непрерывным изменением контактной электродвижущей силы, которая сильно растет по мере разрежения. Но эта точка зрения маловероятна.[3] Наоборот, эти явления могут быть совершенно определенно истолкованы, исходя из предположения, что вторичные лучи, испускаемые исследуемыми металлами, уносят с собой отрицательное электричество и освобождают

---

[3] Доказано, что, если создать Круксову пустоту в сосуде, содержащем конденсатор, обкладки которого сделаны из двух металлов M и N, то электродвижущая сила пары MN не будет изменяться; она не зависит также от природы окружающего газа, разреженного или нет, пока металлы M и N не будут нагреты в пустоте так, что из них начнут выделяться содержащиеся в них газы и не будут заменены другим газом (A. Bottomley, Brit. Assoc. Report, 1885; Spiers, Phil. Mag., 49, 70, 1900).

в этих металлах дополнительное положительное электричество. Платина преобразовывает лучи Рентгена значительно сильнее, чем алюминий, и ее эмиссия отрицательного электричества более значительна, чем противоположная по знаку эмиссия алюминия, и поэтому платина заряжается положительно.

Можно обратить явления, поместив алюминий внутрь в *M* и окружив *M* тонким листом платины (0.01 мм) в *ABCDf* (рис. 1) или в *ABCD* (рис. 2). Мы тогда установим, что находящийся внутри алюминий *M*, подверга-

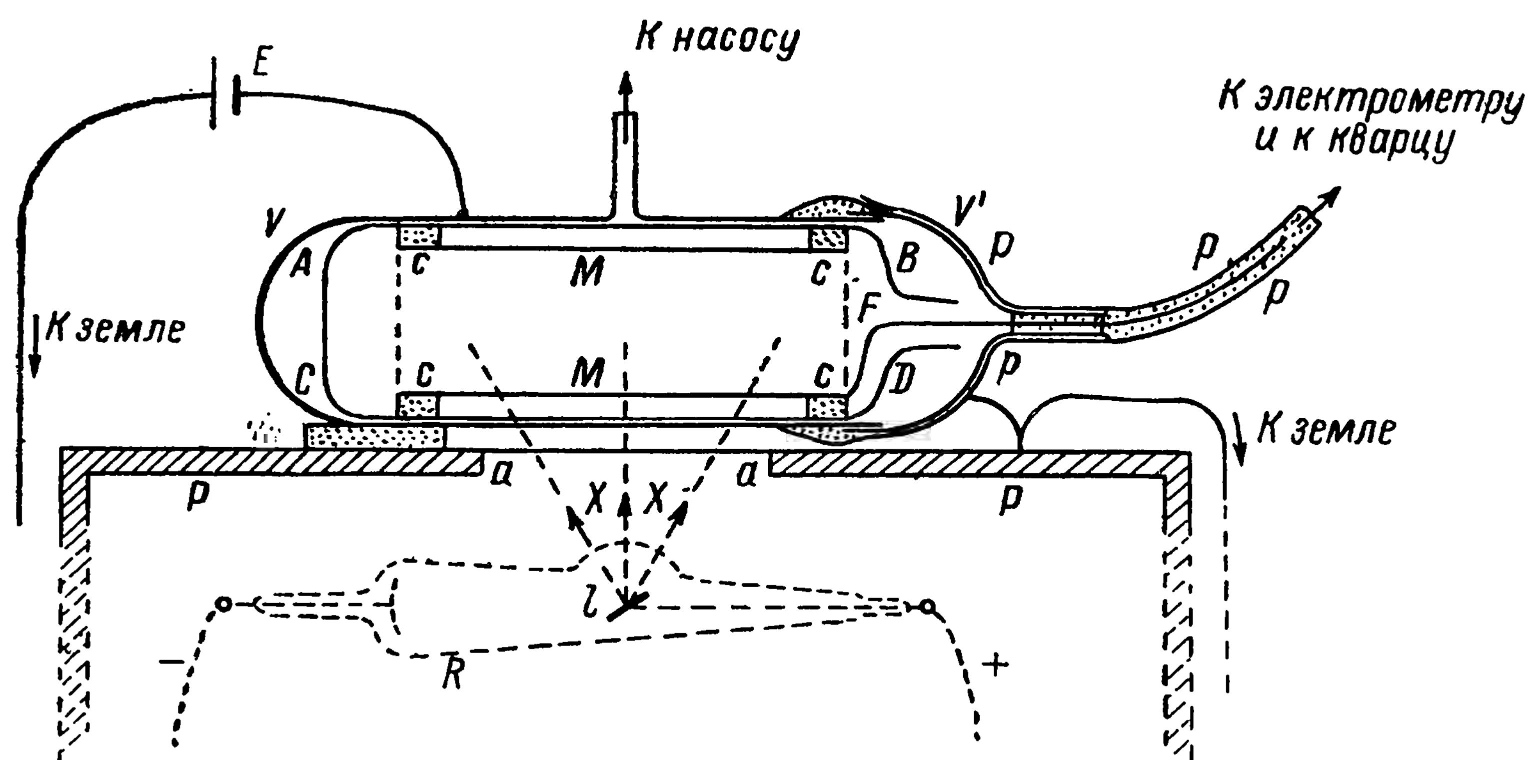


Рис. 2.

ющийся вторичному излучению платины, собирает отрицательное электричество.

Мы использовали различные металлы и установили, в частности, что свинец и платина принадлежат к металлам, которые под действием X-лучей испускают больше отрицательные заряды. За ними следуют олово и цинк. Что касается алюминия, то опыты, проведенные с сосудом Фарадея, покрытого снаружи алюминием и воспринимающим лучи Рентгена, по-видимому, показывают, что достаточно проникающие вторичные лучи этого тела, как и вызывающие их сами рентгеновские лучи, от которых они мало отличаются, лишены электрического заряда.

Если сравнивать два прибора, один со стеклянной относительно тонкой (1 мм) оболочкой и другой — с более толстой (3 мм), то не обнаруживается большого различия в интенсивности отрицательных электрических зарядов вторичных лучей от металла *M*, исследуемого в установке по схеме рис. 2. В установке по схеме рис. 1 X-лучи проникают в коробку *ABCD* через окошки сквозь листочки алюминия толщиной 0.1 мм; внесение стекла толщиной 5 мм на пути рентгеновских лучей ослабляет это явление, но оставляет его сравнимым с тем, которое было сначала; внесение же на пути рентгеновских лучей полумиллиметровой алюминиевой пластинки еле заметно снижает (меньше чем на $^1/_{100}$)

отрицательную электризацию вторичных лучей платины. Отрицательные заряды вторичных лучей возникают главным образом под действием, производимым на металл *M* наиболее проникающими X-лучами падающего пучка. Это обстоятельство подобно тому, которое было уже отмечено в связи с электрической активностью вторичных лучей,[4] но только здесь оно еще более заметно.

Указанное сопоставление согласуется с тем, которое можно сделать относительно проникающей способности отрицательных зарядов, испускаемых металлом *M*. Если вместо того, чтобы оперировать в пустоте, мы поместим конденсатор *MN* в диэлектрик, например в парафин или эбонит, то это испускание отрицательного электричества от *M* к *N* заметно уменьшается. Только в том случае, когда *M* и *N* отделены друг от друга слоем парафина толщиной в доли миллиметра, электрометр еще ощущает слабый заряд, соответствующий току порядка 10^{-12} а; изменения этих слабых токов в зависимости от природы металлов *M* и *N* дают повод думать, что они обусловлены испусканием отрицательных зарядов тяжелыми металлами, быстро поглощаемых парафином вблизи металла.

Прямой опыт, впрочем, обнаружил слабую проникающую способность[5] электрической эмиссии свинца: половина поверхности толстого слоя свинца *MM* (рис. 2) была покрыта набитым на него тонким листом алюминия, толщина которого, вычисленная по его поверхности, весу и плотности 2.7, была равна 0.46 μ. Когда X-лучи ударяются в обнаженную сторону цилиндра, то при давлении 0.001 мм рт. ст. наблюдается ток порядка 10^{-10} а, вызываемый бомбардировкой отрицательным электричеством, исходящим из чистой части свинца *MM*; это значит, что этот свинец *MM* заряжается дополнительным количеством положительного электричества, и для того, чтобы поддерживать его при нулевом потенциале в течение 32.2 сек., необходимо поместить на чашку пьезоэлектрического кварца груз в 500 г, постепенно вводя действие его веса. Если прибор *VV'* повернуть вокруг своей оси на 180° так, что X-лучи будут теперь падать на ту сторону свинца, которая покрыта алюминием, то испускание свинцом отрицательного электричества сквозь этот листок алюминия соответствует грузу 500 г, накладываемому в течение 53.5 сек., т. е. составляет не больше $^3/_5$ испускания чистого свинца. Такой коэффициент переноса электрического заряда мало отличается от того, что наблюдалось с катодными лучами вне пустотной трубки в опытах Ленарда.

---

[4] G. Sagnac. De l'optique des rayons de Röntgen et des rayons secondaires qui en derivent. Paris, 105, 132, 1900.

[5] Исследованный здесь перенос заряда может быть частично или полностью обусловлен последующей диффузией; такое же замечание, впрочем, применимо к переносу электрического действия разряда или радиографического действия вторичных лучей тяжелых металлов, таких, как те, которые были изучены одним из нас (G. Sagnac, op. cit., pp. 89, 94).

Он сравним также с тем, что получается при исследованном уже электрическом действии разряда вторичных лучей и при радиографическом действии.[6]

Важно отметить, что измерения токов отрицательного электричества, испускаемого тяжелыми металлами, на которые падают X-лучи, при данных условиях опыта имеют абсолютное значение; количество электричества, перенесенное этими вторичными лучами при достаточно хорошем вакууме, не зависит от расстояния, проходимого этими вторичными лучами; наоборот, известно, что интенсивность радиографического или радиоскопического электрического действия вторичных лучей, а также X-лучей зависит от способа использования этих лучей и, в частности, от толщины воздушного промежутка электрического конденсатора и от фотографического или люминесцирующего слоев, их принимающих.[7]

Впрочем, по-видимому, не имеется никакой простой связи между энергией вторичных лучей, которую можно измерить болометром, основанным на нагревании некоторого металла этими лучами, и количеством отрицательного электричества, которое они переносят. Вся совокупность наблюденных фактов приводит к мысли, что *вторичная электрическая эмиссия* тяжелых металлов обладает свойствами, подобными свойствам катодных лучей и отклоняемых лучей радия: частицы отрицательного электричества этих лучей способны разъединить нейтральный заряд частиц газа на положительный и отрицательный заряды, значительно превосходящие количество отрицательного электричества этих лучей, по крайней мере до тех пор, пока исследуемый газ не очень сильно разрежен. Не следует смешивать образование катодных лучей, которые в пустоте и даже в отсутствие всякого электрического поля излучаются металлом M, подвергаемым действию X-лучей, с отмеченным уже одним из нас [8] образованием их из потока либо положительного, либо отрицательного электричества в газе под действием электрического поля.

Действие X-лучей и действие вторичных лучей на газ существенно не отличается от действия ультрафиолетовых лучей, исследованного Ленардом.[9] С другой стороны, испускание катодных лучей тяжелым металлом, подвергаемым действию X-лучей, не более странно, чем аналогичное явление, производимое ультрафиолетовыми лучами; профессор Риги [10] и позднее профессор Ф. Ленард [11], профессор Э. Меррит

[6] G. Sagnac, op. cit., p. 94.

[7] Там же, стр. 131.

[8] G. Sagnac, C. r., 5 fevrier 1900, и предшествующая статья: Nouvelles recherches sur les rayons de Röntgen, §§ 5 и 6 (J. de phys., (III), 10, 677, 680, 1901).

[9] Там же, § 7; J. de phys., (III), 10, 683, 1901.

[10] A. Righi, Atti d. R. Acc. d. Lincei, 81, 1900.

[11] Ph. Lenard. Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultravioletes Licht. Ann. Phys., 2, 359, 1900. — Это испускание отрицательного электричества позволило профессору Ленарду объяснить потерю отрицательного электричества под действием ультрафиолетовых лучей.

и О.-М. Стюарт [12] действительно нашли, что металл под действием ультрафиолетовых лучей испускает поток отрицательного электричества даже тогда, когда поверхность металла, поражаемая этими лучами, не была наэлектризована. Такое испускание имеет характер особенно сильно поглощаемых катодных лучей, и его изучение профессор Ленард мог выполнить только в Круксовой пустоте.

Отрицательная электризация вторичных лучей дает новую аналогию между X-лучами и ультрафиолетовыми лучами. Становится все более и более вероятным, что среди вторичных лучей имеются ненаэлектризованные лучи такого же рода, как и падающие X-лучи, которые их производят рассеиваясь или трансформируясь.



[12] E. Merritt, O.-M. Stewart. The development of cathode rays by ultraviolet light. Phys. Rev., 10, 220, 1900; J. de phys., (III), 10, 578, 1901.

XXI

НОВЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА И ИСПУСКАЕМЫЕ ИМИ ЛУЧИ [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ)

Урановые лучи. Исследования радиоактивных веществ имели своей исходной точкой открытие Беккерелем урановых лучей. Испускание особых лучей соединениями урана и свойства этих лучей были изложены Беккерелем в его докладе [2]. Мы напомним только, что урановые лучи, или *лучи Беккереля*, характеризуются следующими свойствами: они распространяются прямолинейно; они, как и свет, действуют на фотографическую пластинку; в крайне слабой степени они могут проходить через различные экраны, но при условии, что толщина этих экранов крайне незначительна; они не отражаются, не преломляются и не поляризуются; при прохождении через газы они делают их слабыми проводниками электричества.

Урановое излучение сомопроизвольно и постоянно: оно не поддерживается какой-либо известной возбудительной причиной; оно, по-видимому, нечувствительно к изменениям температуры и освещенности.

Если отвлечься от неизвестной причины возникновения урановых лучей и рассматривать только их свойства, то можно утверждать, что между урановыми лучами, с одной стороны, и катодными лучами и лучами Рентгена — с другой, имеется некоторая аналогия; имеется также аналогия со вторичными лучами, создаваемыми металлами с большим атомным весом под действием лучей Рентгена.

Мы назовем *радиоактивными* те вещества, которые испускают лучи Беккереля.

Метод измерения. Для изучения радиоактивности различных веществ мы пользовались электрическим методом. Мы измеряли проводимость, приобретенную воздухом, под влиянием радиоактивного вещества.

Вот каков был прибор, который служил для этой цели: конденсатор (рис. 1) состоял из двух пластинок *A* и *B*. Радиоактивное вещество в виде

порошка помещалось на пластинке *B*; оно делало воздух между пластинками проводящим. Чтобы измерить эту проводимость, пластинку *B* держали при высоком потенциале, соединяя ее с одним из полюсов батареи *P*, с большим числом элементов; другой полюс был отведен к земле. Пластинку *A* с помощью провода *CD* удерживали при потенциале земли; тогда между этими двумя пластинками возникал электрический ток.

Потенциал пластинки *A* измерялся электрометром *E*. Если прервать в точке *C* ее соединение с землей, то пластинка *A* заряжалась, и получающийся заряд заставлял отклоняться электрометр. Скорость нарастания этого отклонения пропорциональна силе тока и может служить мерой последней. Однако предпочтительнее производить такие измерения, компенсируя заряд пластинки *A*, поддерживая показания этого электрометра на нуле. Заряды, подлежащие измерению, чрезвычайно слабы; их можно компенсировать с помощью пьезоэлектрического кварца *Q*, одна из обкладок которого соединена с пластинкой *A*, а другая отведена к земле. Нагружая площадку *H*, пластинке кварца сообщали известное состояние напряжения; это состояние напряжения устанавливалось постепенно и вызывало выделение определенного количества электричества в течение некоторого измеряемого промежутка времени.

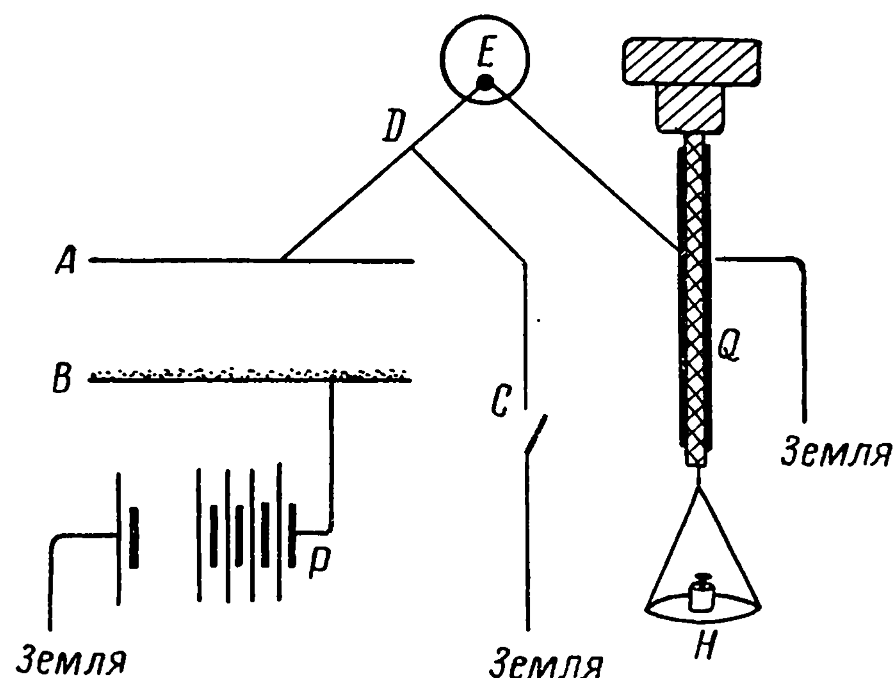


Рис. 1.

Такая операция может быть отрегулирована так, что в каждый момент времени будет иметь место компенсация количества электричества, проходящего через конденсатор, и количества электричества противоположного знака, доставляемого кварцем.[1] Таким путем можно измерить в *абсолютной мере* то количество электричества, которое проходит через конденсатор за данное время, т. е. определить *силу тока*. Такое измерение не зависит от чувствительности электрометра.

Радиоактивность соединений урана. При проведении некоторого числа подобных измерений оказалось, что радиоактивность урановых соединений представляет собой явление, могущее быть точно измерено. Она мало меняется с температурой, на нее почти не влияют колебания последней в окружающей среде; на нее не влияет освещение активного

[1] Такой результат достигается очень легко, если груз поддерживать рукой и позволять ему только постепенно увеличивать давление на пластинку *H* так, чтобы показания электрометра все время оставались на нуле. При небольшом навыке рука очень точно делает то движение, которое необходимо для успеха этой операции. Такой способ измерения слабых токов описан Жаком Кюри в его диссертации.

вещества и незаметно какого-либо изменения ее со временем. Толщина слоя применяемого активного вещества также имеет небольшое значение, лишь бы слой был непрерывным и толщина его не превышала несколько десятых долей миллиметра.

Изучение проводимости воздуха под действием лучей Беккереля было проведено рядом физиков. Очень обстоятельное исследование этого вопроса было опубликовано Резерфордом; основные результаты его можно найти в обзоре Беккереля.

При данном конденсаторе и для данного вещества сила тока возрастает с увеличением разности потенциалов, существующей между пластинками, с давлением газа, заполняющего конденсатор, и с увеличением расстояния между пластинками (лишь бы это расстояние не было слишком велико по сравнению с их диаметром). Однако при больших разностях потенциала ток стремится к некоторому предельному значению, которое практически постоянно. Это есть *ток насыщения*, или *предельный ток*. Подобным же образом при некотором достаточно большом расстоянии между пластинками предельный ток уже более почти не изменяется при изменении этого расстояния. Именно этот ток, получаемый при таких условиях, и был принят в качестве меры радиоактивности в наших исследованиях (конденсатор находился в воздухе при атмосферном давлении).

Законы проводимости воздуха, вызванной лучами Беккереля, тождественны законам, найденным для лучей Рентгена; механизм явления, по-видимому, один и тот же в обоих случаях. Теория ионизации воздуха лучами Рентгена или лучами Беккереля хорошо передает наблюдаемые факты. Согласно этим представлениям, число ионов, производимых за одну секунду в газе, тем больше, чем сильнее излучение, поглощаемое этим газом. Чтобы получить предельный ток при данном излучении, необходимо, с одной стороны, добиться полного поглощения этого излучения газом, применяя достаточную поглощаемую массу, и, с другой стороны, использовать для создания тока все возникшие ионы, применяя сильное электрическое поле, достаточное для того, чтобы число рекомбинирующихся ионов составляло только незначительную часть полного числа образовавшихся ионов.

Порядок величины токов, полученных нами с помощью урановых соединений, был 10^{-11} а для конденсатора, обкладки которого имели диаметр 8 см и расстояние между которыми было 3 см.

Приводим относительные числа для различных соединений урана; i обозначает силу тока в амперах:

	$i \cdot 10^{11}$ а
Металлический уран (содержащий немного угля)	2.3
Черная окись урана U_2O_5	2.6
Зеленая окись урана U_3O_4	1.8
Гидратная урановая кислота	0.6

Урановокислый натрий	1.2
Урановокислый калий	1.2
Уранат аммиака	1.3
Сернокислый уран	0.7
Сульфат уранила и сернокислый калий	0.7
Азотнокислый уранил	0.7
Фосфорнокислая медь и уранил	0.9
Урановокислый сульфид	1.2

Радиоактивные вещества. Естественно спросить, не испускают ли лучи Беккереля другие тела, помимо соединений урана? Шмидт исследовал с этой целью много разных веществ и нашел, что существует другая группа радиоактивных тел, а именно соединения тория.[2] Один из нас провел в то же время аналогичную работу, результаты которой были опубликованы, когда мы еще не ознакомились с работой Шмидта. В этой работе были просмотрены различные соединения почти всех известных простых тел; соединения тория оказались радиоактивными.

Было установлено, что радиоактивность соединений урана и тория есть атомное свойство. Оно, по-видимому, связано с тем веществом, которое им наделено; оно не может быть уничтожено ни изменением физического состояния, ни химическими превращениями. Химические соединения и смеси, содержащие уран и торий, в первом приближении тем активнее, чем больше в них содержание этих металлов. Добавление любого неактивного вещества уменьшает активность, так как оно действует одновременно и как недеятельное, и как поглощающее вещество.

Радиоактивность соединений тория того же порядка, что и радиоактивность соединений урана; окислы обоих металлов обладают весьма схожей активпостью.

Не представляет ли собой атомная радиоактивность общее свойство? Маловероятно, чтобы это свойство принадлежало какому-то одному роду материи и не принадлежало бы всем другим. Однако наши измерения позволяют сказать, что у элементов, действительно рассматриваемых, как таковые, включая сюда наиболее редкие и наиболе гипотетические, активность, если она существует, по крайней мере в 100 раз слабее, чем у металлического урана в нашем приборе с пластинками.

По мере возможности каждый элемент был исследован в различных химических соединениях. Были изучены:

1) все легко добываемые металлы и металлоиды и некоторые наиболее редкие чистые продукты, полученные из коллекции Этара;

2) следующие редкие элементы: галлий, германий, неодим, празеодим, ниобий, скандий, гадолиний, эрбий, самарий, рубидий, в образцах,

---

[2] G. Schmidt, Wied. Ann., 65, 141, 1898.

предоставленных нам Демарсэ; иттрий, иттербий с новым эрбием, гольмий, в образцах, предоставленных Урбеном;

3) большое число каменных пород и минералов.[3]

Сырой фосфор, помещенный между пластинками конденсатора, делает воздух проводящим. И все-таки мы не считаем это тело радиоактивным, подобно урану и торию. В самом деле, фосфор при этих условиях окисляется и испускает световые лучи, в то время как соединения урана и тория радиоактивны, причем эта радиоактивность не испытывает никаких изменений, могущих быть обнаруженными какими-либо известными способами; более того, фосфор неактивен ни в своей красной модификации, ни в своих соединениях.

Лучи тория. Наше исследование соединений тория показало:

1) что толщина применяемого активного слоя оказывает значительное влияние, особенно при пользовании окислами; ток увеличивается с толщиной слоя;

2) что явление протекает закономерно, только если пользоваться тонким ($^1/_4$ мм) активным слоем; наоборот, если брать толстый слой (6 мм), то получаются числа, колеблющиеся в широких пределах, особенно в случае окиси;

3) что лучи тория более проникающие, чем лучи урана, и что лучи, испускаемые толстым слоем окиси тория, значительно более проникающие, чем те, которые испускают тонкие слои.[4]

Особенности излучения тория были в последнее время предметом очень обстоятельных исследований. Оуэнс[5] показал, что постоянство тока получается только в закрытом приборе по прошествии достаточно продолжительного времени. Он также показал, что в случае соединений тория этот ток может быть значительно ослаблен потоком воздуха, что не имеет места у соединений урана; Оуэн подробно исследовал это явление. Вскоре после этого Резерфорд[6] опубликовал аналогичные результаты и высказал гипотезу, что соединения тория испускают не только лучи, подобные лучам урана, но что, кроме того, они испускают некоторую *эманацию*, состоящую из предельно тонких материальных частиц, которые сами по себе радиоактивны.

Радиоактивные минералы. Среди веществ, радиоактивность которых мы изучали, имеется большое число минералов. Некоторые из них оказались активными.[7]

---

[3] Металлический уран, использованный в этом исследовании, был любезно предоставлен Муассаном.

[4] M. Curie, C. r., 126, 1101, 1898.

[5] Owens, Phil. Mag., 48, 360, 1899.

[6] E. Rutherford, Phil. Mag., 49, 1, 1900.

[7] Многие образцы минералов находились в коллекции Музея. Они были любезно предоставлены в наше распоряжение Лакруа.

Вот числа, полученные при помощи того же прибора с пластинками:

	$i \cdot 10^{11}$a
Смоляная руда из Иоангеоргенштадта	8.3
» » » Иоахимсталя	7.0
» » » Пшибрана	6.5
» » » Корнуэльса	1.6
Клевеит	1.4
Халколит	5.2
Аутунит	2.7
Торит	1.4
Орангит	2.0
Монацит	0.5
Ксенотим	0.03
Эсхинит	0.7
Фергюсонит	0.4
Самарскит	1.1
Ниобит	0.3
Карнотит	6.2

Все эти минералы содержат уран и торий; в их радиоактивности нет ничего удивительного, но интенсивность явления у некоторых минералов неожиданна. Так встречаются смоляные руды (руда окиси урана), которые в 4 раза более активны, чем металлический уран; халколит, кристаллический фосфат меди и урана в 2 раза более активны, чем уран; аутунит, фосфорнокислый калий и уран так же активны, как и сам уран. Согласно нашим предшествующим выводам, ни один минерал не может оказаться более активным, чем уран и торий. Чтобы разъяснить это обстоятельство, один из нас изготовил искусственный халколит по методу Дебрэ, взяв чистые вещества. Этот искусственный халколит имел вполне нормальную активность, соответствующую его составу; она была в 2.5 раза меньше активности урана.

Отсюда становится весьма вероятным, что столь высокая активность смоляной руды, халколита, аутунита связана с тем, что эти минералы содержат малые количества какого-то сильно радиоактивного вещества, отличного от урана, тория и других известных простых тел.

Мы задались целью выделить это вещество из смоляной руды, и нам удалось показать, что можно, пользуясь обычными методами химического анализа, выделить из смоляной руды такие вещества, радиоактивность которых примерно в 100 000 раз выше активности металлического урана.

Метод исследования. Проводя эти исследования, единственно чем мы руководились, была радиоактивность; вот как мы ею пользовались: измерялась активность какого-либо продукта; производилось его химическое разделение, измерялась активность всех полученных продуктов и определялось, осталось ли искомое активное вещество целиком в одном из них, или оно разделилось между ними, и в какой пропорции. Мы

получали, таким образом, указания, которые в известной мере были аналогичны данным спектрального анализа. Чтобы иметь сравнимые числа, надо измерять активность веществ в твердом состоянии и хорошо высушенных. Главная трудность этих исследований состояла в том, что смоляная руда имеет чрезвычайно сложный состав: она заключает в заметном количестве почти все известные металлы.

Временно активный газ. Мы прежде всего обнаружили, что нагретая в пустоте смоляная руда дает очень активные продукты сублимации, но в очень малом количестве. Собирая эти газообразные продукты сублимации, мы получили некоторый газ, который, будучи заключен в стеклянную трубку, действует во внешнем пространстве как заметно радиоактивное тело. В продолжение месяца излучение, испускаемое этим газом, действовало на фотографическую пластинку и вызывало разряд наэлектризованных тел; затем активность постепенно уменьшалась, до полного исчезновения. В спектроскопе активный газ обнаруживал линии окиси углерода. Смоляная руда содержит, кроме того, аргон и гелий. Мы убедились, что окись углерода не радиоактивна. Аргон и гелий, выделенные из фергюсонита, также не радиоактивны. Условия образования этого активного газа и исчезновения его активности подлежат еще объяснению.

Полоний, радий, актиний. Анализ смоляной руды мокрым способом вместе с изложенным выше методом привел к установлению существования в этом минерале трех сильно радиоактивных химически различных веществ: *полония*, найденного нами,[8] *радия*, который мы открыли вместе с Бемоном,[9] и *актиния*, который был открыт Дебьерном.[10]

Полоний есть вещество, сопровождающее висмут, извлекаемый из смоляной руды, и очень сходный с ним по своим аналитическим свойствам. Висмут все более обогащается полонием, путем следующих операций фракционирования:

1) сублимацией сернистых соединений в пустоте; активное сернистое соединение обладает большей летучестью по сравнению с обыкновенным сернистым висмутом;

2) осаждением азотистых растворов водой; осажденный основной нитрат более активен, чем соль, оставшаяся в растворе;

3) осаждением сероводородом из очень крепкой соляной кислоты; осажденные сернистые соединения значительно более активны, чем соль, оставшаяся в растворе.

Радий представляет собой вещество, сопутствующее барию, извлекаемому из смоляной руды; он повсюду сопровождает барий в его реакциях и отделяется от него вследствие различной растворимости хлористых соединений в воде, в смеси воды и алкоголя или в соляной кислоте. Мы концентрировали его и отделяли от бария фракционной кристаллизацией

---

[8] C. r., **127**, 175, 1898.
[9] Там же, стр. 1215.
[10] Там же, **129**, 593, 1899; **130**, 906, 1900.

хлористых соединений; хлористый радий менее растворим, чем хлористый барий. Из трех новых радиоактивных веществ только радий был выделен в виде почти чистой соли.

Актиний сопровождает некоторые тела группы железа, содержащиеся в смоляной руде; он, по-видимому, особенно близок к торию, от которого пока не отделен. Торий, содержащий актиний, также нелегко отделить от других элементов группы железа; их отделение в общем было неполным. Дебьерн применял следующие способы отделения:

1) осаждение из кипящих растворов, слегка окисленных соляной кислотой, гипосульфитом натрия при избытке последнего; радиоактивные свойства почти полностью удержаны осадком;

2) действие фтористоводородной кислоты и фтористого калия на свежеосажденные и взвешенные в воде гидраты; растворенная часть малоактивна, и таким путем можно отделить титан;

3) осаждение нейтральных растворов солей азотной кислоты при помощи перекиси водорода; осадок увлекает радиоактивное тело;

4) осаждение нерастворимых сульфатов; каждый раз, как мы осаждали нерастворимый сульфат, например сернокислый барий, из раствора, содержащего торий, а также актиний, этот последний выпадал и осадок оказывался сильно радиоактивным; затем торий, содержащий актиний, извлекали, переводя сульфаты в хлористые соединения и осаждая их из растворов аммиаком; этот процесс очень прост и, как мы видим, сильно отличается от того, что вообще применяется для разделения элементов.

Все три новых радиоактивных вещества содержатся в смоляной руде в исчезающе малых количествах. Чтобы их получить в приемлемых концентрациях, нам пришлось переработать много тонн отходов урановой руды. Грубая переработка происходит на заводе, обрабатывающем сырье, затем следует работа по очищению и обогащению. Мы извлекли таким образом из нескольких тысяч килограмм первоначального материала всего несколько дециграммов продукта, активность которого была огромна по сравнению с той рудой, из которой он происходил. Совершенно ясно, что вся эта работа была продолжительной, трудной и дорогостоящей.[11]

[11] Мы обязаны очень многим лицам и обращаемся с благодарностью ко всем тем, кто пожелал помочь нам в этой работе. Австрийское правительство предоставило безвозмедно в наше распоряжение первую тонну переработанного отхода (от государственного завода в Иоахимстале в Богемии). Парижская академия наук, Общество содействия национальной индустрии, анонимный жертвователь снабдили нас средствами для переработки некоторого количества материала. Наш дорогой друг Дебьерн разработал чрезвычайно полезный метод обработки остатка и организовал эту обработку, которая производилась на заводе Центрального общества химических материалов. Это Общество согласилось произвести обработку и часть фракционирования в обременительных для него условиях.

Всем им мы выражаем нашу искреннюю благодарность.

Гизелю в Брауншвейге также удалось приготовить очень активные образцы из висмута с полонием и бария с радием.

Согласно недавним исследованиям Дебьерна, Гизеля, Крукса и Беккереля, [12] в результате определенной обработки из урановых солей можно извлечь очень малое количество какого-то сильно активного вещества, которое, вероятно, содержит актиний. Очищенный таким способом уран менее активен, чем исходный, и, вероятно, можно добиться того, чтобы он потерял всю свою радиоактивность. Тогда уран не будет более радиоактивным элементом. Это обстоятельство, если оно обнаружится, не станет, однако, противоречить идее о том, что радиоактивность есть некоторое атомное свойство; но только тогда надо приписать актинию то свойство, которое приписывали урану. Поскольку трудно получить уран, свободный от актиния, понятно, что уран представляется каким-то атомнорадиоактивным элементом. Те соображения, которые привели к открытию новых радиоактивных элементов, сохраняют свое значение.

Спектр радия. Чрезвычайно важно проверить всеми возможными способами справедливость высказанной в этой работе гипотезы о существовании новых радиоактивных элементов. Применительно к радию спектральный анализ полностью подтверждает эту гипотезу.

Демарсэ любезно согласился заняться исследованием наших веществ тем точным методом, которым пользуются при изучении фотографий спектров.

Помощь такого компетентного ученого была для нас большим благодеянием, и мы приносим ему нашу искреннюю благодарность за его согласие провести эту работу. Результаты спектрального анализа привели нас к убеждению о достоверности наших заключений, тогда как прежде у нас были сомнения относительно интерпретации результатов нашей работы.

Первые образцы хлористого бария с радием средней активности, исследованные Демарсэ, обнаружили одновременно с линиями бария существование новой линии (3814.7) в ультрафиолетовой части спектра, имеющей заметную интенсивность. В более активных продуктах, приготовленных позднее, Демарсэ заметил, что линия 3814.7 усилилась; в то же время появились другие новые линии, причем эти новые линии и линии бария имели в спектре сравнимую между собой интенсивность. В последних изученных образцах новый спектр преобладал и были видны только три наиболее яркие линии бария, что указывает на присутствие этого металла в качестве посторонней примеси. Эти образцы можно считать состоящими из почти совершенного чистого хлористого радия.

---

[12] F. G i e s e l, Ber. Dtsch. chem. Ges., juni 1900; W. C r o o k e s, Proc. Roy. Soc., mai 1800: H. B e c q u e r e l, C. r., 130, 206, 372, 809, 979, 1154, 1900.

Приводим, согласно Демарсэ,[13] список главных линий радия в области спектра между $\lambda=5000$ и $\lambda=3500$. Интенсивность каждой линии выражена числами; наиболее интенсивная линия отмечена числом 16.

λ	Интенсивность	λ	Интенсивность
4826.3	10	4600.3 (?)	3
4726.9	5	4533.5	9
4699.8	3	4436.1	8
4692.1	7	4340.6	12
4683.0	14	3814.7	16
4641.9	4	3649.6	12

Все эти линии резкие и узкие, а три из них — 3814.7, 4683.0, 4340.6, кроме того, и яркие; их интенсивность сравнима с интенсивностью наиболее ярких линий, известных в настоящее время. Одновременно в спектре были замечены две яркие туманные полосы.

Первая, симметричная, полоса простирается от 4631.0 до 4621.9 и имеет максимум при 4627.5. Вторая, более яркая, ослабевает в ультрафиолетовой части спектра; она внезапно начинается у 4463.7, проходит через максимум при 4455.2; область максимума простирается до 4453.4; потом размытая полоса, постепенно ослабляясь, простирается почти до 4390. В части меньшей преломляемости, в нефотографируемой части спектра, единственно заметной была линия 5665 (приблизительно); она значительно слабее, чем линия 4826.3. Общий вид спектра был аналогичен спектру щелочноземельных металлов; известно, что эти металлы имеют спектры, состоящие из ярких линий и нескольких размытых полос.

Демарсэ полагает, что радий можно отнести к телам, обладающим наиболее чувствительной спектральной реакцией. Между тем первоначальная активность должна быть приблизительно в 50 раз выше активности обычного урана, чтобы можно было ясно обнаружить главные линии радия на фотографиях спектра. С помощью чувствительного электрометра можно обнаружить радиоактивность и в случае, если она достигает только $^1/_{100}$ активности обычного урана; мы видим, что при обнаружении присутствия радия радиоактивность представляет собой признак в несколько тысяч раз более чувствительный, нежели спектральная реакция.

Исследованный Демарсэ весьма активный висмут с полонием дает в спектроскопе только линии висмута. Точно так же приготовленный Дебьерном очень активный торий с актинием дает только линии тория.

Атомный вес радия. По мере того как мы получали продукты бария, все более и более богатые радием, один из нас проводил последовательные определения атомного веса металла, входящего в хлористый радий, освобожденный от всяких примесей.[14]

---

[13] C. r., **127**, 1218, 1898; **131**, 258, 1900.
[14] M. Curie, C. r., **129**, 760, 1899; **131**, 382, 1900.

Хлор дозировали хлористым серебром, удаляя безводный хлорид. При нагревании до 130° гидратный хлорид теряет всю свою кристаллизационную воду, после этого никакого изменения веса не получается, даже при нагревании безводного хлорида в течение нескольких часов до 150°; это указывает на отсутствие заметной потери хлора. У продуктов со средней активностью атомный вес оказался почти такой же, как у бария (137.5). Но у продуктов, все более и более активных, атомный вес все увеличивается. У продукта, настолько богатого радием, что линии радия имели у него интенсивность несколько большую, чем интенсивность линий бария, атомный вес оказался равным 174.

К сожалению, оказалось невозможным провести измерения с тем почти чистым продуктом, который был исследован спектроскопически Демарсэ, так как в нашем распоряжении было только несколько сантиграммов этого продукта — слишком малое количество, чтобы можно было провести дозировку. Можно было только заключить, что атомный вес радия значительно больше 174, и все, по-видимому, указывает на то, что это вещество есть высший гомолог бария в ряде щелочноземельных металлов [3].

Количество радия, содержащегося в урановых рудах, чрезвычайно мало. Для того чтобы получить несколько сантиграммов чистого хлористого радия и несколько дециграммов менее концентрированных продуктов, необходимо обработать две тонны отходов урановой руды. Чтобы иметь возможность определить атомный вес чистого радия и исследовать физические и химические свойства этого нового металла, нужно было бы иметь возможность переработать еще несколько тонн отходов урановой руды, что потребовало бы новых затрат.

Лучи, испускаемые новыми радиоактивными веществами. Лучи Беккереля, испускаемые новыми радиоактивными веществами, значительно более интенсивны, чем лучи обыкновенного урана; эти лучи *по меньшей мере* в 100 000 раз сильнее, но, по правде говоря, уже более невозможно определить эту интенсивность лучей вышеописанным методом. В самом деле, с этими очень активными веществами электрический ток между двумя пластинками конденсатора продолжает расти с увеличением разности потенциалов, и нам никогда не удавалось достичь предельного тока при тех напряжениях, которыми мы пользовались в наших измерениях. Кроме того, у соединений радия и актиния часть излучения состояла из сильнопроникающих лучей, которые проходили сквозь конденсатор, и его металлические обкладки совершенно не участвовали в ионизации воздуха между этими обкладками.

Лучи полония очень интенсивны, но очень слабопроникающи; они уже не обнаруживаются в воздухе на расстоянии нескольких сантиметров; даже очень тонкий твердый экран пропускает только незначительную их часть.

Излучение радия одновременно состоит из лучей, слабопроникающих, и из лучей, сильнопроникающих. Эти последние способны пронизать не-

сколько сантиметров металла; они также могут распространяться в воздухе на расстоянии больше 1 м от местонахождения радия. Для этих проникающих лучей свинец и платина наиболее непрозрачны; алюминий, стекло и парафин относительно прозрачны.

Фотографическое действие новых веществ на малых расстояниях чрезвычайно сильно. На больших расстояниях можно получить *радиографию* от радия при достаточно длительном времени экспозиции. Можно, например, получить радиографию компаса в футляре или кошелька, пользуясь несколькими сантиграммами хлористого бария с радием, помещенным в стеклянную ампулу. При расстоянии в 20 см необходимо несколько часов экспозиции; при расстоянии в 1 м экспозиция требует нескольких дней, но и тогда изображение очень слабое.

Излучение солей бария, содержащих радий, возрастает со временем, начиная с момента приготовления их в твердом состоянии. Это излучение, по-видимому, всегда стремится к некоторому пределу. Такое увеличение излучения особенно интенсивно в случае хлористого бария, содержащего радий.[15]

Если выпарить досуха хлористый барий с радием, то активность сухого продукта будет сначала возрастать очень быстро, потом более медленно и, наконец, станет в 5—6 раз больше первоначальной активности. Вот, например, те значения активности, которые получены нами с малоактивными продуктами (первоначальная активность была в 95 раз больше активности обычного урана): первональная активность — 95, по прошествии одного дня — 120, через два дня — 165, через 3 дня — 210, через 9 дней — 310, через 24 дня — 381, через 300 дней — 410.

Когда мы растворили активный хлорид и заново высушили, начальная активность, полученная непосредственно после просушки, была тем слабее, чем дольше эта соль оставалась в растворе; однако эта активность, по-видимому, стремится к некоторому постоянному значению, которое практически достигается, когда соль находится в растворе в течение 4 или 5 дней. Отсюда видно, какие предосторожности надо принимать, если хотят характеризовать какое-либо из этих веществ его активностью.

Мы вообще принимали в качестве наиболее практической исходной точки начальную активность после высушивания вещества, остававшегося несколько дней в растворенном состоянии.

Наоборот, активность соединений полония медленно уменьшается со временем (Гизель), и эта потерянная активность, по-видимому, не может быть восстановлена, по крайней мере без вмешательства какого-либо внешнего воздействия.

Лучи новых радиоактивных веществ сильно ионизуют воздух. Можно, как и в случае катодных лучей или лучей Рентгена, легко вызвать конденсацию пересыщенного водяного пара.

Под влиянием лучей, испускаемых радиоактивными веществами, про-

[15] Это явление было впервые описано Гизелем (F. Giesel, Wied. Ann., 69, 91, 1899).

бивной искровой промежуток между двумя металлическими проводниками уменьшается.[16]

Явления флуоресценции, световые явления. Лучи, испускаемые новыми радиоактивными веществами, вызывают флуоресценцию некоторых тел. Мы впервые обнаружили это явление, действуя полонием и радием через тонкий листок алюминия на слой платиносинеродистого бария. Однако также и большое число других веществ способны становиться фосфоресцирующими под их действием, например, стеклянная бумага и т. п. Беккерель изучал это действие на солях урана, на алмазе, на цинковой обманке и т. д. Бари [17] показал, что соли щелочных и щелочноземельных металлов, флуоресцирующие под действием света и лучей Рентгена, также флуоресцируют и под действием лучей радия.

Все соединения бария, содержащего радий, самопроизвольно светятся,[18] но галоидные соли, безводные и сухие, испускают свет особенно интенсивно. Это свечение не видно при сильном дневном свете, но его легко можно видеть в полумраке или в помещении, освещенном газом. Испускаемый свет достаточно ярок, чтобы можно было читать при наличии небольшого количества вещества. Излучение света исходит от всей его массы, в то время как у обычных фосфоресцирующих тел свет излучается главным образом той частью поверхности, которая освещена. Во влажном воздухе вещества, содержащие радий, теряют большую часть своей способности светить, но она восстанавливается при высушивании (Гизель). Свечение, по-видимому, сохраняется. По истечении года не замечается какого-либо изменения в светимости и у веществ со слабой активностью при их сохранении в запаянных трубках и темноте. У хлористого бария, содержащего радий, сильно активного и ярко светящегося, свет меняет свой цвет по прошествии нескольких месяцев, приобретая фиолетовый оттенок и несколько ослабляясь; одновременно это вещество испытывает некоторые превращения, но, растворяя снова соль в воде и высушивая ее, получаем первоначальное свечение. В темноте можно получить ощущение света при закрытом глазе, помещая сильно активный барий с радием или у виска или около века (Гизель). Это явление наблюдается и тогда, когда радиоактивная соль покрыта алюминием. Указанное явление можно приписать фосфоресценции сред глаза под действием невидимых лучей радия.

Химические действия, окрашивание стекла. Радиации, излучаемые сильно активными веществами, способны вызывать некоторые превращения, некоторые химические реакции. Лучи, испускаемые продуктами, содержащими радий, производят окрашивающее действие на стекло и фарфор.[19]

---

[16] J. Elster, H. Geitel, Wied. Ann., 69, 673, 1899.

[17] Bary, C. r., 130, 776, 1900.

[18] M. et P. Curie, Bull. de séances de la Soc. franç. de phys., 3 mars 1899; F. Giesel, Wied. Ann., 69, 91, 1899.

[19] M. et P. Curie, C. r., 129, 823, 1899. [Наст. изд., стр. 208].

Окрашивание стекла, обычно коричневое или фиолетовое, очень интенсивно, оно происходит в самой массе стекла и сохраняется после удаления радия. В течение более или менее продолжительного времени все стекла приобретают окраску, причем присутствие свинца не необходимо. Естественно сблизить этот факт с недавно отмеченным явлением, именно с окрашиванием пустотных стеклянных трубок для лучей Рентгена после их долгого употребления.

Гизель показал, что кристаллизованные галоидные соли щелочных металлов (каменная соль, сильвин) окрашиваются под влиянием радия так же, как и под действием катодных лучей. Он показал, что такого же рода окрашивание возникает при пребывании щелочных солей в парах натрия.[20]

Бумага изменяется и окрашивается под действием лучей радия. При некоторых обстоятельствах *вблизи сильно активных соединений происходит образование озона.*

Соединения, содержащие радий, по-видимому, изменяются со временем, вероятно, под действием их собственного излучения. Так, кристаллы хлористого бария с радием не окрашены в момент осаждения их из раствора, но по прошествии нескольких дней они часто приобретают окраску то желтую, то красиво розовую; эта окраска исчезает при растворении. Хлористый барий, содержащий радий, имеет запах жавелевой воды; бромистый барий выделяет бром. Эти медленные изменения в общем случае выявляются спустя некоторое время после приготовления твердого продукта. За это же время последний меняет свой вид и цвет, принимая желтый или фиолетовый оттенок. Испускаемый свет становится также более фиолетовым.

Лучи радия преобразуют платиносинеродистый барий в коричневую разновидность, более слабо светящуюся; они также изменяют сернокислый уранил и сернокислый калий, делая их желтыми. Платиносинеродистый барий испытывает частичное превращение и восстановление под действием света. Поместим радий под слой платиносинеродистого бария, рассыпанного по бумаге; платиносинеродистый барий начинает светиться; если эту систему держать в темноте, в платиносинеродистом барии происходят изменения и его свечение заметно падает, но если все это держать на свету, то платиносинеродистый барий частично восстанавливается, а если его вновь поместить в темноту, то свечение опять становится довольно сильным. Таким образом, с помощью какого-либо флуоресцирующего и радиоактивного тела можно осуществить систему, которая функционирует как некоторое фосфоресцирующее тело с очень длительной фосфоресценцией.

Гизель приготовил платиносинеродистый барий, содержащий радий. Когда эта соль начинает кристаллизоваться, она имеет вид обыкновенного платиносинеродистого бария и очень сильно светится. Но мало-помалу

[20] F. Giesel, Verh. Dtsch. phys. Ges., 2, 9, 1900.

эта соль самопроизвольно окрашивается, принимая коричневый оттенок; в то же самое время кристаллы становятся дихроичными. В таком состоянии соль светится значительно слабее, хотя ее радиоактивность увеличивается.[21]

Действие температуры. Радиоактивные вещества сохраняют свои свойства и после того, как их продержали при высокой температуре. Уран, расплавленный в электрической печи, радиоактивен. Хлористый барий, содержащий радий, при расплавлении (около 800°) активен и светится. Известно, что, наоборот, фосфоресценция, вызываемая освещением, прекращается под действием нагревания.

Пока еще имеется мало сведений о том, как изменяется с температурой испускание лучей радиоактивными телами. Однако мы знаем, что это испускание сохраняется при низких температурах. Мы помещали в жидкий воздух трубку, содержащую хлористый барий с радием, и констатировали, что свечение при этом сохраняется; трудно определить степень свечения, когда трубка погружена в жидкий воздух, однако в момент извлечения трубки из холодного сосуда она представлялась даже более яркой, чем при обычной температуре. Мы также заметили, что при температуре жидкого воздуха радий продолжает возбуждать флуоресценцию сернокислого уранила и сернокислого калия.[22]

Действие магнитного поля на лучи Беккереля. Лучи отклоняемые и неотклоняемые [[4]]. Замечено, что лучи, испускаемые радиоактивными веществами, имеют много общих свойств с катодными лучами Рентгена. Катодные лучи, так же хорошо как и лучи Рентгена, ионизуют воздух, действуют на фотографические пластинки, возбуждают флуоресценцию и не испытывают правильного отражения. Однако катодные лучи отличаются от лучей Рентгена тем, что они отклоняются от своего прямолинейного пути под действием магнитного поля, и тем, что они заряжены отрицательным электричеством.

Работы Гизеля, Мейера, Швейдлера и Беккереля показали, что лучи новых радиоактивных веществ отклоняются магнитным полем совершенно так же, как и катодные лучи.

Полное изложение вопроса о действии магнитного поля на излучение радиоактивных тел дано в докладе Беккереля; мы здесь ограничимся указанием некоторых деталей экспериментов, которые нам показали, что это излучение содержит две сильно различающиеся между собой группы лучей: лучи отклоняемые и лучи неотклоняемые.[23] Эти опыты были выполнены электрическим методом.

Радиоактивное тело A (рис. 2) посылает лучи в направлении AD в промежуток между пластинками P и P'. Пластинка P поддерживается при потенциале 500 в; пластинка P' соединена с электрометром и с пьезоэлект-

[21] F. Giesel, Wied. Ann., 69, 91, 1899.
[22] M. et P. Curie, Bull. de seançes de la Soc. franç. de phys., 2 mars 1900.
[23] P. Curie, C. r., **130**, 73, 1900. [Наст. изд., стр. 211].

рическим кварцем. Измеряют силу тока, проходящего через воздух под влиянием излучения. При помощи электромагнита можно по желанию создать магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка во всем пространстве $EEEE$. Если лучи отклоняются хотя бы даже слабо, они уже не проникают в пространство между пластинками P и P' и ток прекращается. Та область, в которой распространяются лучи, окружена свинцовыми массами B, B', B'' и сердечником электромагнита; когда лучи отклоняются, они поглощаются свинцовыми массами B и B'.

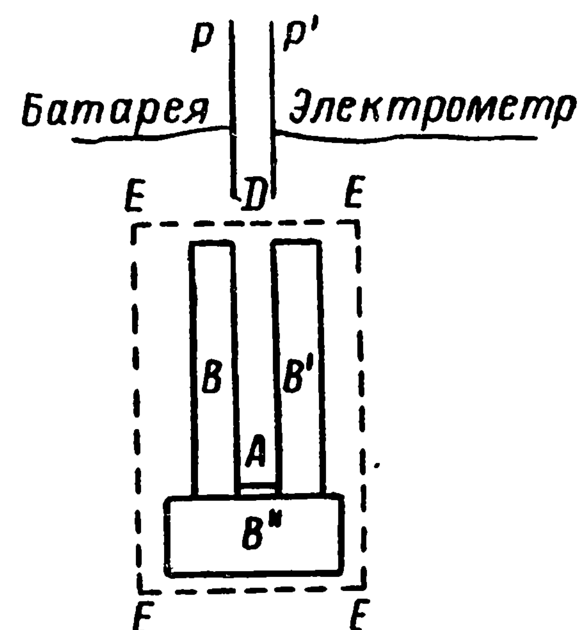


Рис. 2.

Полученные результаты существенно зависят от расстояния AD излучающего тела A от края конденсатора D. Если это расстояние AD достаточно велико (больше 7 см), то все лучи радия, которые достигают конденсатора, будут отклонены и отметены магнитным полем силой 2500 единиц. Если расстояние AD меньше 65 мм, то только часть лучей будет отклонена полем; впрочем, эта часть уже полностью отклонена полем в 2500 единиц, и доля отклоняемых лучей не увеличивается с возрастанием поля от 2500 до 7000 единиц.

Доля неотклоняемых лучей тем больше, чем меньше расстояние AD между излучающим телом и конденсатором. При малых расстояниях лучи, которые могут быть отклонены, составляют только очень малую часть всего излучения.

Приводим результаты, полученные для одного образца углекислого бария с радием.

В первой строке приведены расстояния AD в см. Числа второй строки означают тот ток, который имеет место при действии поля, причем для каждого расстояния ток, получающийся без магнитного поля, принимается равным 100.

Эти числа можно рассматривать как процент неотклоняемых лучей.

Расстояние AD	7.1	6.9	6.5	6.0	5.1	3.4
Процент неотклоняемых лучей	0	0	11	33	56	74

Отклоняемые лучи наиболее проникающие.

Если пропускать пучок лучей через поглощающую пластинку (алюминий или черную бумагу), то проходящие лучи все отклоняются полем, причем так, что с помощью экрана и магнитного поля все излучение в конденсаторе уничтожается. Пластинка алюминия толщиной $^1/_{100}$ мм достаточна для того, чтобы задержать все неотклоняемые лучи, когда излучаемое вещество находится достаточно далеко от конденсатора; при меньших расстояниях (34 и 51 мм) необходимы два листка алюминия по $^1/_{100}$ мм, чтобы получить тот же результат.

Аналогичные измерения были проведены с четырьмя веществами, содержащими радий (хлоридами и карбонатами), обладающими очень разной активностью; отношение между активностями крайних продуктов было не меньше 300. Между тем были получены очень сходные результаты.

Можно отметить, что у всех образцов проникающие и отклоняемые магнитом лучи составляли только малую часть всего излучения; они влияют только в очень слабой степени на те измерения, в которых полное излучение используется для получения проводимости воздуха.

Беккерель показал, что приготовленные нами соединения полония испускают только неотклоняемые лучи. Лучи, испускаемые полонием, можно изучать электрическим методом.

Если изменять расстояние AD от полония до конденсатора, то сперва не наблюдается никакого тока, пока это расстояние достаточно велико; если же приближать полоний, то при некотором расстоянии, которое для исследованного образца было равно 4 см, излучение внезапно проявляется с достаточной интенсивностью; если продолжать приближать полоний, то ток после этого возрастает закономерно, но магнитное поле не производит никакого действия.

Неотклоняемое излучение полония представляется ограниченным в пространстве; в воздухе оно едва выходит за пределы некоторого подобия оболочки, окружающей это вещество на расстоянии в несколько сантиметров.

Полоний Гизеля, пока он был только что приготовлен, испускал лучи, отклоняемые магнитным полем. Из всех образцов полония, приготовленных нами, ни один не испускал таких лучей, и мы не знаем причины этой разницы.

Дебьерн нашел, что актиний испускает лучи, отклоняемые магнитным полем; излучение актиния, по-видимому, имеет много общего с излучением радия. Следует, однако, сделать существенную оговорку общего характера о значении опытов, которые мы будем описывать. Когда мы указываем на долю лучей, отклоняемых магнитом, то здесь дело идет только об излучении, способном вызывать ток в конденсаторе. Если в качестве реактива на лучи Беккереля пользоваться флуоресценцией или действием их на фотографическую пластинку, то эта доля будет, вероятно, совсем иной. Пока что в определении интенсивности излучения имеется нечто чисто условное; эта интенсивность имеет смысл только в пределах применяемого метода измерения.

Пользуясь фотографическими пластинками, Виллар [5] нашел, что соединения, содержащие радий, испускают неотклоняемые, очень сильнопроникающие лучи. Эти неотклоняемые лучи действуют на фотографическую пластинку только при продолжительной экспозиции, и даже при пользовании чувствительной пластинкой они составляют только малую часть полного излучения. В экспериментах, произведенных электрическим методом, эти лучи обнаруживаются слабо или даже совсем не воспринимаются.

Таким образом, излучение радия состоит: 1) из лучей, не отклоняемых магнитным полем и очень слабопроникающих; 2) из небольшой доли лучей неотклоняемых, но сильнопроникающих; 3) из отклоняемых лучей различной природы и, как это показал Беккерель, тем менее отклоняемых, чем они более проникающи.

Проникающая способность неотклоняемых лучей. Поглощение экранами всей совокупности лучей радия было изучено Мейером и Швейдлером, а также Беккерелем, который об этом сообщает в своем докладе. Мы займемся здесь только теми любопытными особенностями, которые наблюдаются у малопроникающих лучей полония и у более поглощаемых лучей радия. В то время как коэффициент поглощения проникающих лучей радия уменьшается по мере увеличения толщины пронизываемого вещества, неотклоняемые и малопроникающие лучи, наоборот, тем более поглощаемы, чем больше толщина слоя вещества, который они уже прошли.[24]

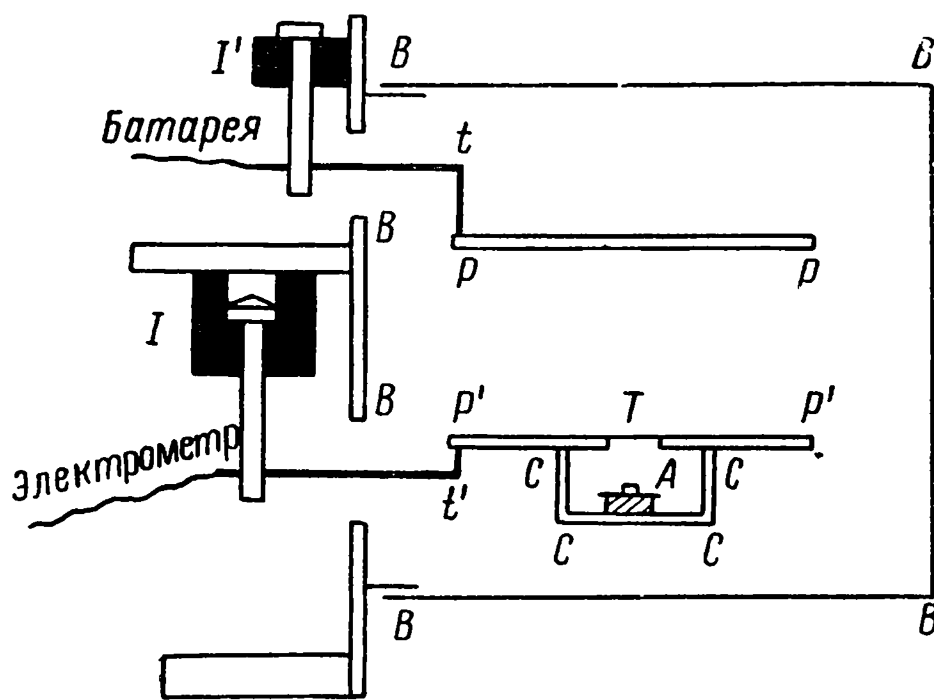


Рис. 3.

Этот особый закон поглощения противоположен тому, что нам известно для других излучений.

Один из нас использовал для этого исследования наш прибор для измерений электрической проводимости в следующей установке.

Две пластинки конденсатора PP и $P'P'$ (рис. 3) были расположены горизонтально и помещены в металлическом ящике $BBBB$, соединенном с землей. Активное тело A, помещенное в металлической коробке $CCCC$ с толстыми стенками, образующей одно тело с пластинкой $P'P'$, действует на воздух в конденсаторе сквозь металлическую сетку T. Для образования тока используются только те лучи, которые прошли через сетку; электрическое поле ограничено сеткой.

Можно изменять расстояние AT от активного тела до сетки. Поле между обкладками конденсатора создается при помощи батареи; измерение тока производится с помощью электрометра и пьезоэлектрического кварца.

Помещая на активное тело A различные экраны и изменяя расстояние AT, можно измерять поглощение лучей, которые проходят в воздухе большие или меньшие расстояния.

Полоний особенно пригоден для изучения неотклоняемых лучей, так как те образцы, которыми мы располагали, хотя и были очень активны, но совершенно не испускали отклоняемых лучей.

---

[24] M. Curie, C. r., 130, 76, 1900.

Вот результаты, которые были получены с полонием.

При некоторых определенных расстояниях AT (4 см и выше) никакого тока не возникает: лучи не проникают в конденсатор. При уменьшении расстояния AT лучи в конденсаторе появляются почти внезапно, так что при небольшом уменьшении этого расстояния очень слабый ток переходит в весьма заметный; если продолжать дальше приближать излучающее тело к сетке T, возрастание тока происходит закономерно.

Если покрыть излучающее вещество пластинкой прокатанного алюминия в $^1/_{100}$ мм, то поглощение, производимое этой пластинкой, будет тем больше, чем больше расстояние AT.

Если на первую пластинку поместить вторую такую же, то каждая пластинка поглощает некоторую долю падающего на нее излучения; эта доля больше для второй пластинки, чем для первой; таким образом, вторая пластинка как бы обладает бóльшим поглощением.

В помещаемой ниже таблице мы приводим: в первой строке — расстояния в см между полонием и сеткой T; во второй строке — доли лучей в %, прошедшие через одну пластинку алюминия; в третьей строке — доли лучей в %, пропущенных двумя пластинками алюминия:

Расстояние AT	3.5	2.5	1.9	1.45	0.5
Процент лучей, пропущенных одной пластинкой	0	0	5	10	25
Процент лучей, пропущенных двумя пластинками	0	0	0	0	0.7

В этих опытах расстояние между обкладками P и P' было 3 см. Мы видим, что введение алюминиевой пластинки уменьшает интенсивность излучения в более сильной степени в удаленных областях, чем в областях близких.

Это явление еще более отчетливо, чем это показывают предыдущие числа. Так, проникание 25% при расстоянии 0.5 см представляет собой среднее значение этой величины всех лучей, преодолевших это расстояние, крайние же лучи обладают очень слабой проницаемостью. Если бы мы, например, улавливали только лучи, содержащиеся между 0.5 и 1 см, то мы имели бы большую проницаемость. Действительно, если мы приблизим обкладку P к обкладке P' на расстояние 0.5 см, то доля пропущенного алюминиевой пластинкой излучения (при $AT=0.5$ см) составляет 47%, а через две пластинки она составляет 5% первоначального излучения.

Неотклоняемые лучи радия ведут себя так же, как лучи полония. Можно отдельно исследовать только неотклоняемые лучи, направляя магнитным полем отклоняемые лучи в сторону. Вот результаты одного опыта такого рода, проведенного с одной и той же алюминиевой пластинкой.

Расстояние AD (рис. 2)	6.0	5.1	3.4
Процент лучей, прошедших через алюминий	3	7	24

Это как раз те лучи, которые дальше всех распространяются в воздухе и сильнее всего поглощаются алюминием. Таким образом, существует сходство между неотклоняемыми лучами радия и таковыми же полония, наоборот, природа отклоняемых лучей у них различна.

Если использовать все испускаемые лучи, то явление окажется усложненным из-за присутствия отклоняемых и проникающих лучей, для которых имеет место другой закон поглощения. Если проводить наблюдения на большом расстоянии, то эти последние лучи доминируют, и поглощение мало; если же наблюдать на малом расстоянии, то доминируют лучи неотклоняемые, и поглощение будет тем слабее, чем ближе вещество; при промежуточных расстояниях поглощение проходит через максимум, а проникающая способность — через минимум.

Во всех этих опытах экран был расположен на одном и том же расстоянии от радия; результаты измерений таковы:

Расстояние AD	7.1	6.5	6.0	5.1	3.4
Процент лучей, пропущенных алюминием	91	82	58	41	48

При таких особых свойствах неотклоняемых лучей радиоактивных тел естественно задать вопрос, представляют ли они собой в действительности лучи, обладающие прямолинейным распространением?

Беккерель разъяснил этот вопрос прямым опытом. Полоний, испускающий неотклоняемые лучи, был помещен в очень узкой прямолинейной полости, проделанной в листе картона. Таким образом получался линейный источник излучения. Медная проволока диаметром в 1.5 мм была помещена против этой полости параллельно ей на расстоянии 5 мм. Фотографическая пластинка располагалась параллельно выше на расстоянии 8 мм. После экспозиции в течение 10 мин. появлялась очень четкая геометрическая тень ожидаемых размеров, а очень узкие полутени с обеих сторон хорошо соответствовали ширине источника. Такой же опыт столь же хорошо удается, если поместить против проволоки двойной листок расплющенного алюминия, который должен быть пронизан лучами.

Таким образом, дело идет о лучах, способных давать совершенные геометрические тени. Опыт с алюминием показывает, что эти лучи, проходя через пластинку расплющенного алюминия, мало рассеиваются и эта пластинка почти не испускает вторичных лучей, аналогичных вторичным лучам Рентгена.

Электрический заряд лучей радия. Катодные лучи, как это показал Перрен, заряжены отрицательным электричеством.[25] Кроме того, они, согласно экспериментам Перрена и Ленарда,[26] могут переносить свой за-

[25] J. Perrin, C. r., **121**, 1130, 1897; Ann. de chim. et de phys. (VII), **2**, 433, 1897. В опытах Перрена порядок величины заряда был 10^{-6} кулона в момент разряда катушки.

[26] Ph. Lenard, Wied. Ann., **64**, 279, 1898.

ряд сквозь металлические оболочки, соединенные с землей, и сквозь изолированные пластинки. Во всех тех точках, где поглощаются катодные лучи, происходит непрерывное выделение отрицательного электричества. Мы установили, что то же самое происходит с отклоняемыми лучами радия. Таким образом, отклоняемые лучи радия заряжены отрицательным электричеством.

Поместим радиоактивное вещество на одну из обкладок конденсатора и соединим эту обкладку с землей; другую обкладку соединим с электрометром; она получает и поглощает лучи, испускаемые указанным веществом. Если лучи несут заряд, то должно наблюдаться непрерывное накопление электричества в электрометре. Такой опыт, проведенный в воздухе, не позволил нам обнаружить заряд лучей. Однако он не был достаточно чувствителен. Воздух между обкладками становился проводящим; электрометр не был изолирован и мог обнаруживать только достаточно большие заряды.

Чтобы неотклоняемые лучи не создавали трудностей в этом опыте, их можно было устранить, покрыв излучающий источник тонким металлическим экраном; результат опыта от этого не изменялся.[27]

Мы без особого успеха повторили этот опыт в воздухе, позволяя лучам проникать внутрь цилиндра Фарадея, соединенного с электрометром.[28]

Уже из предыдущих опытов можно заключить, что заряд лучей, испускаемый излучающим веществом, значительно слабее заряда катодных лучей.

Чтобы констатировать слабое выделение электричества на проводнике, поглощающем лучи, необходимо этот проводник хорошо изолировать; для этого его надо поставить в условия, защищающие его от воздействия воздуха, либо окружить его хорошим твердым диэлектриком. Мы пользовались этим последним способом.

Проводящий диск *MM* (рис. 4) связан с электрометром, металлическим стержнем *t*; диск и стержень полностью окружены изолирующим материалом *iiii* и все это закрыто металлической оболочкой *EEEE*, соединенной с землей. На одной из сторон диска изоляция *pp* и металлическая оболочка были очень тонкие. Эта сторона как раз подвергалась действию лучей соли бария, содержащей радий, *R*, помещенный снаружи в свинцовом

---

[27] Собственно говоря, в этих опытах всегда наблюдается отклонение электрометра, но легко убедиться, что это отклонение есть результат контактной электродвижущей силы, существующей между пластинкой, соединенной с электрометром, и соседними проводниками; эта электродвижущая сила заставляет гальванометр отклоняться из-за проводимости воздуха, вызываемой действием излучения радия.

[28] Использование цилиндра Фарадея не необходимо, но он имеет некоторые преимущества в том случае, когда происходит сильное рассеяние лучей поражаемыми стенками сосуда. Можно надеяться также собрать и использовать эти лучи, если только они имеются.

лотке.[29] Лучи, испускаемые радием, пронизывают металлическую оболочку и изолирующую пластинку *pp* и поглощаются металлическим диском *MM*. Этот последний становится источником постоянного и непрерывного выделения отрицательного электричества, которое обнаруживается электрометром и измеряется при помощи пьезоэлектрического кварца.

Получаемый таким путем ток чрезвычайно слаб. При очень активном хлористом барии, содержащем радий, образующем слой с поверхностью 2.5 см^2 и толщиной 0.2 см, получается ток порядка 10^{-11} а, причем лучи в этом случае до своего поглощения диском *MM* проходят слой алюминия толщиной 0.01 мм и слой эбонита толщиной 0.3 мм.

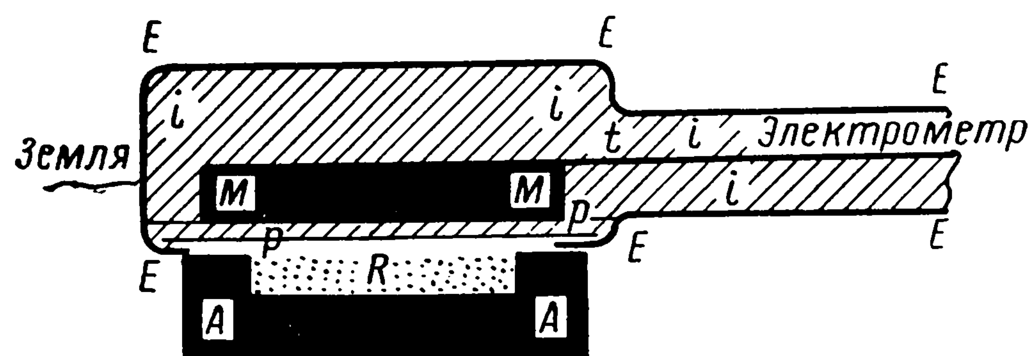


Рис. 4.

Мы последовательно использовали для диска *MM* свинец, медь и цинк, а для изоляции — эбонит и парафин; результаты получались те же самые.

Ток уменьшается при удалении источника радиации *R* или при использовании менее активного препарата.

Такие же результаты были нами получены при замене диска *MM* цилиндром Фарадея, содержащим воздух, но окруженным снаружи изолирующим материалом. Отверстие цилиндра, обращенное к источнику радиации, было закрыто тонким изолирующим слоем *pp*.

Наконец, мы провели обратный опыт, поместив свинцовый лоток с радием в середину изолирующей среды и соединив его с электрометром (рис. 5); вся установка была закрыта металлической оболочкой, соединенной с землей.

При этих условиях электрометр показал, что радий получает положительный заряд, равный по абсолютной величине отрицательному заряду в предыдущем опыте. Лучи радия пронизывают тонкую диэлектрическую пластинку *pp* и покидают внутренний проводник, унося с собой отрицательное электричество.

Неотклоняемые лучи радия устранены в этих экспериментах, будучи почти полностью поглощены чрезвычайно тонким слоем вещества. Описанный метод не годится для исследования заряда лучей полония, так как эти лучи обладают очень малой проникающей способностью. Мы не наблюдали никакого намека на существование заряда у полония, который испускает только неотклоняемые лучи. Однако по указанным выше причинам из этого опыта нельзя выводить какого-либо заключения.

[29] Изолирующая оболочка должна быть сплошной. Всякая трещина, содержащая воздух и идущая от внутреннего проводника до металлической оболочки, является причиной тока, возникающего от контактной электродвижущей силы и обусловленного проводимостью воздуха под действием лучей радия.

Итак, как у отклоняемых лучей радия, так и у катодных лучей, лучи переносят электричество. До сих пор не было известно существование электрических зарядов, не связанных с материей. Следовательно, мы принуждены при изучении испускания отклоняемых лучей радия пользоваться той же теорией, которой в настоящее время пользуются при изучении катодных лучей. Согласно этой баллистической теории, высказанной Круксом и затем развитой и дополненной Дж. Дж. Томсоном, катодные лучи состоят исключительно из мельчайших частиц материи, которые выбрасываются катодом с большой скоростью и которые заряжены отрицательным электричеством. Можно также представить себе, что радий посылает в пространство материальные частицы, заряженные отрицательно.

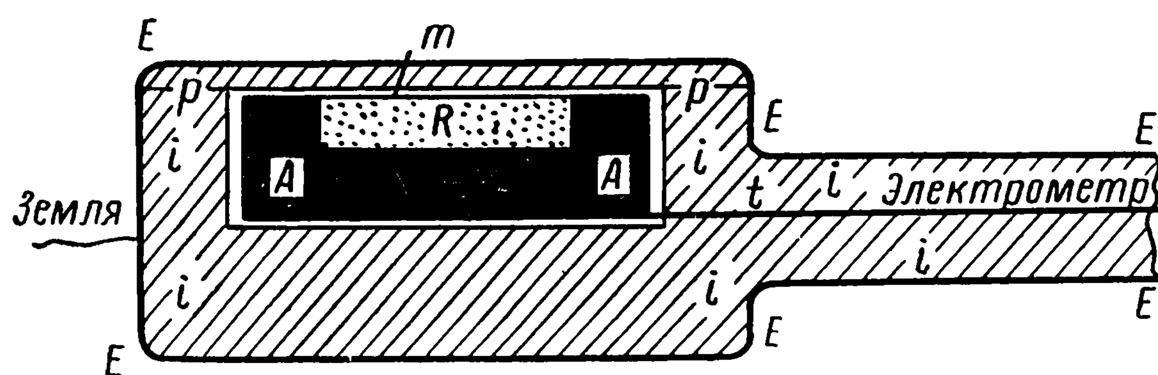


Рис. 5.

Препарат радия, хорошо электрически изолированный, в короткое время самопроизвольно будет заряжаться до очень высокого потенциала. Согласно баллистической гипотезе, потенциал будет увеличиваться до тех пор, пока разность потенциалов между этим препаратом и окружающими проводниками не окажется достаточной для того, чтобы воспрепятствовать удалению испускаемых электрических частиц и принудить их возвращаться обратно на источник радиации.

Если радий излучает весомую материю, он должен испытывать потерю в массе. Если отношение заряда к массе такое же, как и в электролизе, то радий в наших опытах будет терять 3 мг-экв. за миллион лет. Эта потеря не может быть определена с помощью весов.

Наведенная радиоактивность. Мы нашли, что все вещества, находящиеся по соседству с радием, приобретают сами некоторую радиоактивность, которая может существовать в течение нескольких часов и даже дней после удаления радия. В более слабой степени такое же явление было наблюдено с полонием.[30] Пока продолжается воздействие радия, *наведенная радиоактивность* растет со временем до некоторого определенного предела. После удаления радия она убывает сначала быстро, затем все более и более медленно, следуя некоторому асимптотическому закону; она стремится исчезнуть или по крайней мере сделаться очень слабой по прошествии достаточно длительного времени.

Подвергая различные металлические диски действию радия, мы могли установить, что природа металла, по-видимому, не имеет решающего зна-

---

[30] M. et P. Curie, C. r., 129, 714, 1899. [Наст. изд., стр. 205].

чения; мы получали результаты того же порядка величины с цинком, латунью, висмутом, никелем, алюминием и свинцом.

Приводим кривую (рис. 6), которая показывает, как меняется с течением времени наведенная радиоактивность, начиная с того момента, как активируемое вещество перестает подвергаться действию радия. Эта кривая относится к цинковому диску диаметром 8 см, который активизировался, будучи помещен на расстоянии 3 см от хлористого бария, содержащего радий, покрывавший поверхность 4 см в диаметре. Образец применявшегося хлорида был примерно в 2000 раз более активен, чем уран; максимальная наведенная радиоактивность была в 20 раз выше, чем у обыкновенного урана; она быстро убывала с момента удаления радия и по прошествии двух часов становилась в 8 раз слабее.

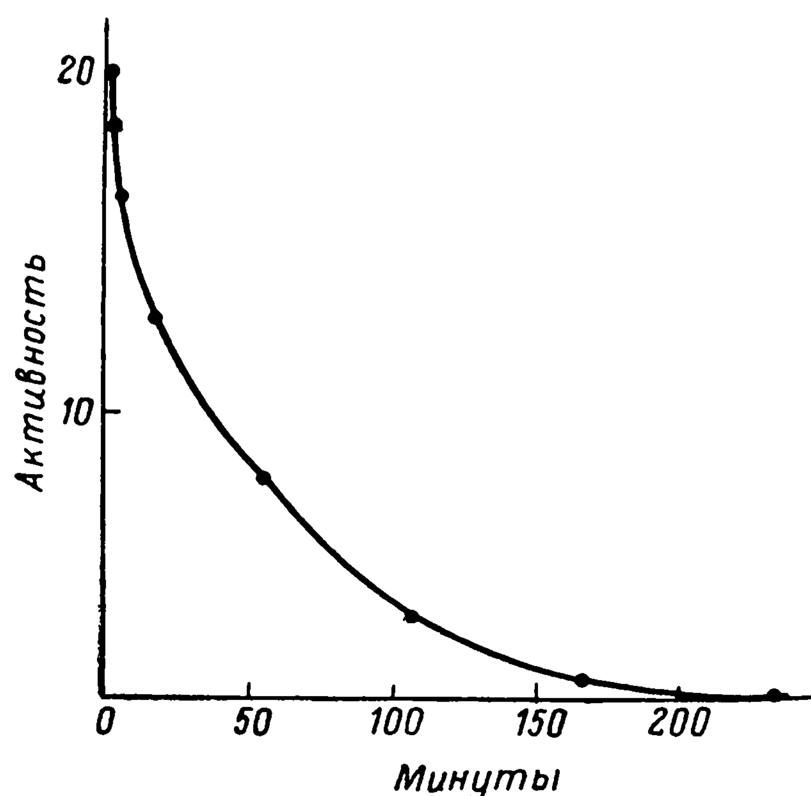


Рис. 6.

Можно спросить, не обусловлена ли наведенная радиоактивность простым переносом активного вещества на соседнее неактивное; такой перенос может осуществляться в форме пыли или пара. Но это объяснение маловероятно по разным причинам. Перенос в виде пыли вряд ли совместим с закономерным и постоянным уменьшением активности. С другой стороны, в качестве активного вещества можно пользоваться хлористым барием с радием, который растворим; тогда можно убедиться, что наведенная радиоактивность не уничтожается при тщательном промывании в воде активированного диска; она не становится больше от нагревания даже при температуре красного каления. Наведенную радиоактивность можно вызвать в каком-либо веществе, подвергая его действию радия, помещенного в совершенно замкнутый металлический ящик, а это делает еще менее вероятной гипотезу о простом переносе материи.

Интенсивность явлений наведенной радиоактивности сильно меняется в зависимости от образцов применяемых активных тел одинаковой активности; так, хлористый барий с радием производит более сильное действие, чем углекислая соль. Некоторые образцы хлористого бария производили очень нерегулярные действия; наведенная активность менялась от одного дня к другому в очень сильной степени без того, чтобы мы могли найти причины этих изменений.

Мы также проводили опыты, создавая разность потенциалов между активным и активируемым телами; отсутствие при этом закономерностей не

позволяет нам еще сказать, в какой степени электрическое поле изменяет интенсивность наведенной радиоактивности.

Мы получали очень интенсивные проявления наведенной радиоактивности, приводя металлические диски в непосредственное соприкосновение с хлористым барием, содержащим радий; по прошествии некоторого времени мы отодвигали эти диски, тщательно их промывали и с помощью электрометра исследовали кривые их радиоактивности. Таким путем была получена радиоактивность, которая при первом измерении оказалась почти в 100 раз больше, чем у урана.

Неактивные вещества, которые вводились в раствор, содержащий очень активные соли радия, вообще говоря, приобретали очень сильную наведенную радиоактивность и сохраняли ее после удаления их от радия. Указанный факт наблюдался как нами, так и Гизелем,[31] который таким путем активировал висмут. Трудность этих опытов состоит в тех исключительных заботах, которые приходится предпринимать для извлечения радия из раствора. Опыт очень хорошо удается с висмутом.

Виллар[32] подвергал действию катодных лучей кусок висмута, помещенный в качестве антикатода в трубку Крукса; этот висмут становился активным, правда в чрезвычайно слабой степени, хотя необходимо было 8 дней экспозиции для того, чтобы заметить его действие на фотографическую пластинку. Таким образом, можно создавать радиоактивность без воздействия какого-либо радиоактивного вещества.

Резерфорд[33] получал наведенную радиоактивность, пользуясь торием в качестве активирующего вещества. Общий результат был тот же, что и получаемый с радием. Вместе с тем, согласно Резерфорду, особенно сильные действия получаются, если вблизи тория поместить какое-нибудь металлическое тело малых размеров (например, тонкую платиновую проволоку), поддерживаемое при отрицательном потенциале в 500 в, в то время как торий соединен с землей. Наведенная радиоактивность сосредоточивается на проволоке. Обрабатывая проволоку серной кислотой и высушивая, Резерфорд получил остаток более активный, чем торий.

Дебьерн[34] добился очень интенсивной наведенной радиоактивности, используя в качестве возбуждающего вещества сильно активный актиний, который, по-видимому, особенно пригоден для получения такого рода действия. Он активировал соли бария, держа их в растворе вместе с солями актиния. Он получил еще более сильную активацию, вводя актиний в осадок сульфата окиси бария, оставляя оба вещества продолжительное время в контакте. После удаления актиния, как это было указано выше, барий оставался активным, если указанный контакт был достаточно продолжительным. Таким образом получается *соль активированного бария*.

---

[31] F. Giesel, Verh. Dtsch. phys. Ges., janvier 1900.
[32] P. Villard, Soc. de phys., juillet 1900.
[33] E. Rutherford, Phil. Mag., 49, 161, 1900.
[34] A. Debierne, C. r., 131, 333, 1900.

Можно спросить, представляют ли собой вещества, активированные таким образом, аналоги обычных радиоактивных веществ? Этим решится очень важный вопрос об атомном характере обычной радиоактивности. Дебьерн ставил этот вопрос, и ему удалось добиться успехов, используя хлористый барий, активированный актинием, о чем мы уже говорили.

Активированный барий обладает частично, но только частично, свойствами *радия.*

Активированный барий остается активным после различных химических преобразований. Таким образом, его активность есть атомное свойство. Хлорид активированного бария фракционируется так же, как хлорид бария, содержащего радий; наиболее активные части наименее растворимы в воде и в соляной кислоте. Дебьерн получил, таким образом, при помощи фракционирования продукты в 1000 раз более активные, чем обыкновенный уран.

Сухой хлорид самопроизвольно светится и испускает лучи, аналогичные лучам радия. Эти лучи отклоняются магнитным полем и вызывают флуоресценцию.

Однако этот *активированный барий* отличается от радия тем, что он не дает спектра радия. К этому основному отличию присоединяется еще и другое: активность его уменьшается со временем, как и у всех других активированных веществ, и по прошествии трех недель эта активность в три раза слабее, чем была в начале, и продолжает убывать.

Дебьерн получил таким образом вещество, обладающее свойствами, промежуточными между свойствами бария и радия.

Результаты, полученные Дебьерном, очень показательны с точки зрения тех идей, которые могут возникнуть по поводу природы химических элементов. К сожалению, актиний, который служил для указанных исследований, встречается в минералах урана еще реже, чем радий, а отделение его еще более затруднительно. Чтобы получить для своих исследований малое количество тория с очень активным актинием, Дебьерн использовал продукты, полученные из тонны урановых отходов, обработанных так, как это мы рассказали выше.

Рассеивание радиоактивной пыли. Когда ведут исследования сильно радиоактивных веществ, то, если хотят обеспечить точные измерения, необходимо принимать особые предосторожности. Различные предметы, употребляемые в химической лаборатории, сразу становятся радиоактивными и действуют на фотографические пластинки через черную бумагу. Пыль, воздух комнаты, одежда — все это радиоактивно. В помещении, в котором проводятся физические исследования, воздух делается проводящим; недавно на это обстоятельство обратили внимание Эльстер и Гейтель.[35] В той лаборатории, в которой мы работали, эта неприятность до-

---

[35] J. Elster, H. Geitel, Ann. der Phys., 2, 425, 1900.

стигла столь острого положения, что мы уже не могли больше располагать достаточно хорошо изолированными приборами.

Следует все же принимать особые предосторожности, чтобы по возможности устранить рассеяние активной пыли, а также избежать явления наведенной активности. Предметы, используемые для химических исследований, не должны никогда вноситься в помещение, где производятся физические измерения, следует по возможности не оставлять в нем ненужных активных веществ. Еще до того как мы приступили к этим нашим исследованиям, мы приобрели привычку при работе со статическими электричеством осуществлять связь между различными приборами при помощи изолированных металлических проволок, защищенных металлическими же цилиндрами, соединенными с землей, предохраняющими эти проволоки от всяких внешних электрических влияний.

При изучении радиоактивных тел такая установка совершенно недостаточна; воздух становится проводящим, изоляция между проводами и цилиндром плохая и контактная электродвижущая сила, неизбежная между ними, создает ток через воздух и отклоняет электрометр. Лучше всего все проводники сделать не соприкасающимися совсем с воздухом, помещая их, например, внутрь цилиндров, заполненных парафином или каким-нибудь другим изолирующим материалом. Мы думаем, что было бы также целесообразно пользоваться в этих исследованиях *совершенно* закрытыми электрометрами.

Природа лучей Беккереля. Лучи Беккереля состоят из смеси лучей, заряженных электричеством и отклоняющихся в магнитном поле, подобно катодным лучам, и лучей, не отклоняемых магнитным полем и подобных лучам Рентгена. В составе такой смеси нет ничего удивительного. В пустотных трубках X-лучи возникают на всякой стенке, о которую ударяются катодные лучи. С другой стороны, X-лучи, ударяясь о тела, порождают вторичные лучи, исследованные Саньяком, и эти вторичные лучи, по-видимому, сами в свою очередь представляют собой смесь неотклоняемых лучей и лучей, заряженных электричеством и подобных катодным лучам.[36] Таким образом, аналогия между самопроизвольным излучением радиоактивных тел и вторичными лучами, вызываемыми рентгеновскими же лучами, большая. Эта аналогия поразила нас еще в самом начале этого исследования и затем стала еще более убедительной.

Однако сама самопроизвольность излучения представляет собой загадку и является предметом глубокого изумления.

Каков источник энергии лучей Беккереля? Надо ли искать его в самих радиоактивных телах или вне их?

В соответствии с тем, что было уже сказано, лучи Беккереля можно рассматривать как некоторое вторичное излучение, обусловленное лучами, подобными X-лучам, пронизывающими все пространство и все тела.

---

[36] P. Curie, G. Sagnac, C. r., 130, 1013, 1900.

Если все излучение, взятое в целом, и не представляет собой вторичного излучения, то это может быть справедливо для одной из двух групп лучей; в качестве первичных лучей можно рассматривать либо неотклоняемые лучи, либо отклоняемые.

В первом случае энергия могла бы быть заимствована у окружающей среды в форме тепла; однако подобная гипотеза находится в противоречии с принципом Карно.

Во втором случае можно было бы прибегнуть к баллистической гипотезе, высказанной Круксом и Дж. Дж. Томсоном для объяснения явлений, связанных с катодными лучами. Радий непрерывно испускает очень маленькие частицы, заряженные отрицательным электричеством. Могущая быть использованной энергия, запасенная в форме потенциальной энергии, постепенно рассеивается; такая точка зрения неизбежно привела бы к отрицанию неизменяемости атома.



XXII

О НАВЕДЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМОЙ СОЛЯМИ РАДИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С А. ДЕБЬЕРНОМ [2])

Г-н Кюри вместе с г-жой Кюри [1] установили, что любое вещество, помещенное вблизи соли бария, содержащей радий, само становится радиоактивным. Эта наведенная радиоактивность сохраняется продолжительное время после удаления указанной бариевой соли, содержащей радий; однако она уменьшается со временем сначала быстро, а затем все более медленно и, по-видимому, асимптотически приближается к нулю. Дебьерн [2] показал, что соли бария, приведенные в тесный контакт с солями актиния, с течением времени приобретают некоторые из свойств солей бария, содержащих радий, и сохраняют такое свойство в продолжение многих месяцев.

С другой стороны, г-жа Кюри,[3] измеряя радиоактивность окиси тория, констатировала некоторые неправильности, которые до настоящего времени не могли быть объяснены. Такие же замечания были сделаны Оуэнсом,[4] который показал, что поток воздуха отчасти уменьшает активность окиси тория. Резерфорд [5] заново исследовал это явление и показал, что воздух, находясь по соседству с окисью тория, а затем удаленный от него, сохраняет свои проводящие свойства в течение приблизительно 10 мин. Равным образом он наблюдал, что окись тория способна вызвать явления наведенной радиоактивности, аналогичные тем, которые создаются солями радия. Наконец, он установил тот важный факт, что тела, заряженные отрицательным электричеством, активируются сильнее, чем другие.

Резерфорд объяснил эти явления тем, что окись тория испускает особую радиоактивную эманацию, увлекаемую воздухом и заряжающуюся поло-

---

[1] M. et P. Curie, C. r., **129**, **714**, 1899. [Наст. изд., стр. 205].
[2] A. Debierne, C. r., **130**, 906, 1900.
[3] M. Curie, C. r., **126**, 1101, 1898.
[4] Owens, Phil. Mag., 48, 360, 1899.
[5] E. Rutherford, Phil. Mag., 49, 1, 161, 1900.

жительным электричеством от положительных ионов воздуха. Эта эманация и есть причина наведенной радиоактивности. Дорн [6] повторил с солями бария, содержащими радий, опыты, проведенные Оуэнсом и Резерфордом с окисью тория.

Наконец, напомним, что в начале своих исследований по радиоактивным телам, г-н Кюри и г-жа Кюри смогли получить при нагревании смоляной руды газ, сохранявший радиоактивность в течение месяца.[7]

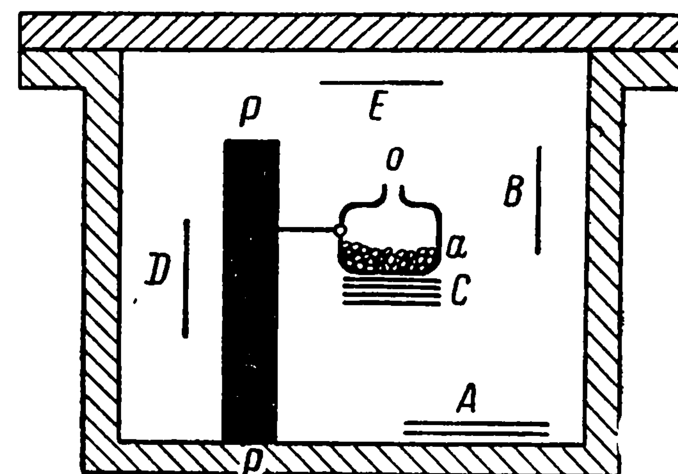


Рис. 1.

Мы предприняли новые исследования этой наведенной радиоактивности, которая проявляется в весьма различных формах и физическая природа которой далеко еще не разъяснена.

Эта радиоактивность изучалась электрическим методом. Мы укажем на следующие опыты.

1. Наведенная радиоактивность оказывается много более интенсивной, когда пользуются закрытым сосудом. Радиоактивное вещество помещается в маленькой ампулке из тонкого стекла *a* с отверстием *o* и располагается в середине совершенно замкнутого сосуда (рис. 1). Различные пластинки *B*, *D*, *E*, подвешенные в сосуде в различных его частях, активируются почти одинаково за один день экспозиции. Пластинка *D*, для защиты от из-

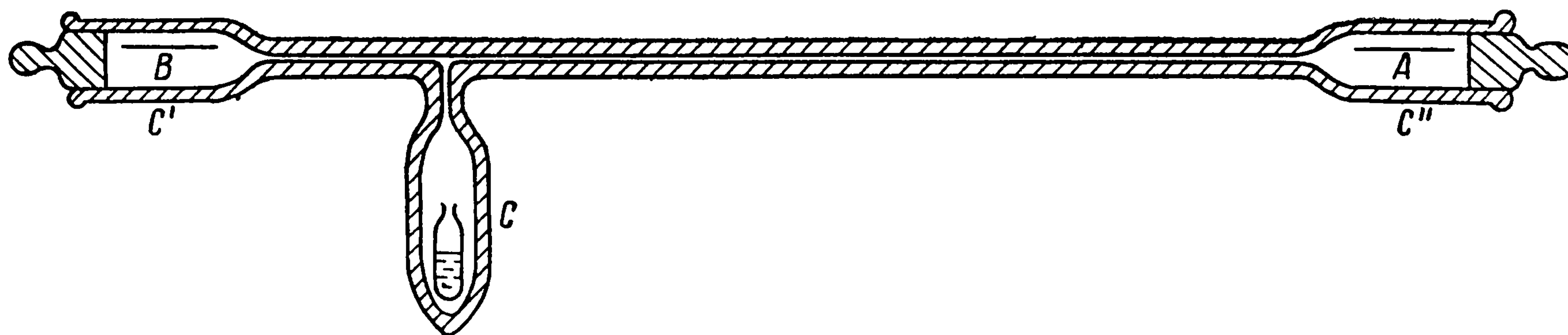


Рис. 2.

лучения помещенная за свинцовым экраном *PP*, активировалась так же, как *B* и *E*. Пластинка *A*, опирающаяся на стенку, сильно активируется со стороны, обращенной к воздушному пространству сосуда; сторона же, обращенная к стенке, не восприимчива. Среди пластинок *C*, расположенных против ампулки, сильно активируется только внешняя грань последней пластинки, обращенная к воздуху в сосуде.

Все вещества (свинец, медь, алюминий, стекло, эбонит, картон, парафин), по-видимому, активируются почти одинаковым образом. В случае

[6] F. E. D o r n, Abh. Naturforsch. Ges. Halle, 23, 1, 1901.

[7] P. et M. C u r i e. Rapports présentés au Congres international de Physique, 3, 79, Paris, 1900. [Наст. изд., стр. 226].

очень активного хлористого бария с радием (атомный вес металла — 174) пластинки, экспонируемые в течение нескольких дней, приобретали активность в 8000 раз большую, чем активность пластинки металлического урана такого же размера. Будучи экспонированы на открытом воздухе, они теряют в течение одного дня большую часть своей активности. Эта активность исчезает гораздо медленнее, если пластинки оставлены в закрытом сосуде после того, как активное вещество было удалено.

Наконец, повторяя указанные эксперименты с полностью закрытой ампулкой a, мы не получили никакой наведенной активности.

2. Маленькая камера C (рис. 2), содержащая активное тело, сообщалась при помощи капиллярных трубок (диаметром меньше 0.1 мм, длиной 5 и 75 см) с камерами C' и C'', где помещаются два активируемых тела A и B. Камеры C, C' и C'' очень малы, активация происходит очень быстро и с такой же интенсивностью, как и в случае, когда тела A и B находятся в той же камере, что и активное тело.

Эти явления были обнаружены с различными солями бария, содержащего радий (хлорид, сульфат, карбонат). Соединения актиния также вызывают наведенную радиоактивность. Наоборот, соли полония, даже очень активные, не вызывают никакой активации. Как, впрочем, известно, полоний не испускает лучей, отклоняемых магнитным полем, и, может быть, следует сопоставить друг с другом эти два факта.

Из этих первоначальных опытов можно заключить, что излучение радия не принимает участия в явлении наведения радиоактивности. Принимать в этом участие могли бы одни только сильнопоглощаемые лучи, которые действуют на воздух, находящийся в непосредственном соприкосновении с излучающим веществом.

Наведенная радиоактивность постепенно передается по воздуху от излучающего вещества активируемым телам; она может даже передаваться через очень тонкие капиллярные трубки. Тела активируются постепенно, причем тем быстрее, чем меньше объем сосуда, в котором они находятся; они стремятся достигнуть предела наведенной активности подобно тому, как это происходит в явлении насыщения. Эта предельная активность тем выше, чем более активен действующий продукт.

Теория эманации Резерфорда позволяет достаточно хорошо объяснить все эти разнообразные результаты; но поскольку можно легко представить себе и другие удовлетворительные объяснения, то нам кажется преждевременным принимать какую-либо теорию. Необходимы новые факты, чтобы разъяснить этот вопрос.

Как бы то ни было, это явление представляется проявлением одного из наиболее существенных свойств радиоактивных тел. Возможно, что оно является необходимым дополнением, характеризующим отклоняемое излучение.



XXIII

О НАВЕДЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ И О ГАЗАХ, АКТИВИРОВАННЫХ РАДИЕМ [1]

(СОВМЕСТНО С А ДЕБЬЕРНОМ)

В предыдущем сообщении мы установили, что наведенная радиоактивность производится излучением солей радия не непосредственно, но что она постепенно распространяется через воздух от соли радия к активирующемуся телу.[1] Мы пытались уточнить роль газов в этом явлении, и вот те новые результаты, которые мы получили.

Активное вещество, содержащееся в небольшой открытой ампулке, было помещено вместе с активируемым телом (например, медной пластинкой) в запаянной трубке, содержащей воздух при атмосферном давлении. Тело понемногу активируется, и процесс завершается тем, что оно приобретает некоторую предельную активность, всегда одну и ту же для того же радиоактивного вещества. Заменяя в таком опыте воздух водородом, мы наблюдали ту же предельную активацию. Можно также повторять этот опыт с воздухом, изменяя давление в трубке; мы установили, что при довольно низком давлении (1 см рт. ст.) предел активации оставался таким же самым. Следовательно, количество и природа присутствующего газа не оказывает влияния на наведенную радиоактивность. Результаты были иными, когда вместо частичного вакуума в трубке мы создали очень хороший вакуум (давление, измеренное манометром, было ниже 0.001 мм рт. ст.) и *когда этот вакуум поддерживался в продолжение всего опыта* благодаря тому, что ртутный насос заставляли действовать непрерывно. При таких условиях тело не активировалось; более того, если оно уже было сделано до этого активным, то его активность исчезала. Таким образом, наведен-

[1] P. Curie, A. Debierne, C. r., **132**, 548, 1901. [Наст. изд., стр. 254].

ная радиоактивность не может распространяться при сильно пониженном давлении в приборе.

Если, после того как был достигнут очень хороший вакуум, отключить прибор от насоса, то оказывается, что по прошествии более или менее продолжительного времени медная пластинка активируется столь же сильно, как и в воздухе. Однако, в то время как эта пластинка активируется, окклюдированный газ выделяется активным веществом и создает в трубке некоторое невысокое давление, изменяющееся при замене исследуемого образца. Можно собрать окклюдированные газы, выделение которых совпадает с появлением наведенной радиоактивности. С этой целью мы прежде всего создали сколь возможно хороший вакуум над радиоактивным веществом, затем нагрели последнее, а выделившийся газ удалили с помощью ртутного насоса. Немедленно же, с помощью маленькой трубки Гейсслера, припаянной к прибору, мы исследовали спектр этого газа; в нем мы не нашли никаких новых линий. Обычно преобладал спектр углекислого газа; видны были также линии водорода, азота и паров ртути от насоса. Собранные газы, объем которых невелик, несмотря на их малую массу, сильно радиоактивны. Эти газы действуют сквозь стекло содержащей их пробирки, мгновенно оставляя след на фотографической пластинке, завернутой в черную бумагу, и очень быстро разряжают наэлектризованные тела. Их активность такова, что они вызывают флуоресценцию стекла пробирки, которая светится в темноте. Стекло быстро чернеет, как будто бы оно было подвергнуто излучению наиболее сильно радиоактивных тел. Активность газа постоянно уменьшается, однако это происходит крайне медленно: собранный газ по прошествии 10 дней все еще оставался очень сильно активным.

Воздух лаборатории, в которой мы работали в течение нескольких лет, постепенно становился все более и более проводящим; в конце концов оказалось невозможным иметь хорошо изолированный прибор, и мы могли производить с электрометром только грубые измерения. Это обстоятельство, как нам кажется, не может быть объяснено непосредственным излучением радиоактивных пылинок, рассеянных по лаборатории; это, вероятно, в значительной степени обусловлено непрерывным образованием радиоактивного газа, подобно тому, о котором мы только что говорили.[2]

Нагревая гидрат хлористого радия в пустоте, мы получили некоторое количество дистиллированной воды, которая была собрана в ампулку. Эта вода обнаружила радиоактивность; будучи выпарена, она не оставила никакого радиоактивного осадка; если сохранять ее в запаянной трубке, то активность ее исчезает очень медленно.

---

[2] Так, например, воздух во всех закрытых ящиках, стоявших в лаборатории, становился в конце концов сильно проводящим, причем его проводимость значительно превосходила электропроводность воздуха комнаты. Достаточно было открыть такой ящик, чтобы понизить эту электропроводность.

Мы пока еще не решаемся разъяснить механизм распространения наведенной радиоактивности. Правда, можно предполагать, что обыкновенный газ, содержащийся в воздухе, активируется вследствие соприкосновения с радиоактивным веществом и затем, диффундируя, сообщает путем соприкосновения свою активность другим телам, однако многие факты не могут быть объяснены с этой точки зрения. Действительно, предельная активация явно не зависит от давления и природы газа; кроме того, распространение активности через капиллярные трубки представляется слишком быстрым, чтобы оно могло происходить путем простой диффузии газа.



XXIV

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЛУЧЕЙ РАДИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С А. БЕККЕРЕЛЕМ [2])

Лучи радия сильно действуют на кожу; их действие аналогично тому, которое получается под влиянием лучей Рентгена.

Первыми наблюдениями такого действия мы обязаны Валкову и Гизелю.[1]

Гизель поместил на свою руку и держал на ней в течение 2 час. бромистый барий с радием, завернутый в целлюлозный листик. Лучи, действуя через целлулоид, вызывали легкое покраснение кожи. Через две-три недели краснота увеличилась, возникло воспаление и кожа отслоилась.

Кюри повторил на самом себе опыт Гизеля, заставляя действовать на свою руку через тонкий гуттаперчивый листок в течение 10 час. хлористый барий с радием с относительно слабой активностью (она была в 5000 раз больше активности металлического урана). После действия лучей кожа стала красной на площади 6 $см^2$; внешний вид покраснения напоминал ожог, но не ощущалось никакой или только очень слабая боль. По истечении нескольких дней краснота, не увеличиваясь в размерах, стала более интенсивной; на 20-й день образовались корочки, затем язва, которую пришлось перевязывать; на 42-й день эпидерма стала заживать у краев; затем заживание распространилось к центру; через 52 дня после действия лучей еще оставалась ранка размером 1 $см^2$ сероватого цвета, что указывало на более глубокое омертвение.

Беккерель, перенося маленькую запаянную трубку, содержащую несколько дециграммов очень активного хлористого бария с радием (активность была в 800 000 раз больше, чем у урана [2]), испытал подобное же дей-

---

[1] Walkoff, Photogr. Rundschau, Okt. 1900; F. Giesel, Ber. Dtsch. chem. Ges., **33**, 3569, 1900.

[2] Упоминаемые нами активности — это те, которые давал прибор Кюри. Они позволяют классифицировать и характеризовать активный продукт, но излучение радия имеет настолько сложный состав, что эти числа не имеют абсолютного значения. С другим устройством получили бы другие числа.

ствие. Вещество было заключено в запечатанной стеклянной трубке длиной приблизительно от 10—15 мм и 3 мм в диаметре. Эта трубка, завернутая в бумагу, помещалась в маленькой картонной коробочке. 3 и 4 апреля эту коробку он несколько раз клал в угол жилетного кармана на время, общая продолжительность которого оценивается примерно 6 час.

13 апреля было замечено, что излучение, прошедшее через трубку, коробку и одежду, вызвало на коже покраснение; в последующие дни оно приобрело более густой оттенок и приняло продолговатую форму овала длиной 6 см и шириной в 4 см. 24 апреля кожа отпала, затем пораженная часть углубилась и началось нагноение; рану пришлось в течение месяца лечить, перевязывая с мазью (oleo-calcaire); омертвелые ткани были удалены, и 22 мая, т. е. через 49 дней после действия лучей, рана закрылась, оставив после себя рубец, отмечающий то место, где находилась трубка.

Во время лечения этого ожога 15 мая появилось второе продолговатое красное пятно против другого угла жилетного кармана, в котором находилось активное вещество. Начало действия относилось или к тому числу, которое указано выше, или, возможно, к 11 апреля, но оно было очень кратким, самое большее 1 час. Эритема появилась по меньшей мере через 34 дня после поражающего действия; воспаление развивалось, имея вид поверхностного ожога; 26 мая началось отпадение кожи; при том же лечении, что и в первом случае, этот ожог заживал гораздо быстрее.

Во время этих наблюдений 10, 11 и 12 апреля та же трубка с активным веществом, помещенная в свинцовую трубку, стенки которой были 5 мм толщиной, находилась в течение 40 час. в другом кармане жилета и не произвела никакого действия.

Прибавим еще, что г-жа Кюри, перенося в маленькой запечатанной трубке несколько сантиграмм того же очень активного вещества, который вызывал описанные выше явления, получила аналогичные ожоги, хотя маленькая трубка была помещена в тонкую металлическую коробку. В частности, получасовое воздействие вызвало через 15 дней появление красного пятна, похожего на поверхностный ожог и для заживления которого потребовалось 15 дней.

Эти факты показывают, что время развития поражений изменяется с интенсивностью активных лучей и с продолжительностью поражающего действия.

Кроме этих сильных действий, на наших руках были следы нашей работы над сильно активными продуктами. Наблюдалась общая тенденция к шелушению; концы пальцев, которыми мы брали трубки или капсулы, заключающие в себе активные продукты, становились жесткими, иногда в них ощущались боли; у одного из нас воспалительное состояние концов пальцев продолжалось в течение 15 дней и закончилось отслоением кожи, но ощущение боли еще не исчезало полностью и спустя 2 месяца.

XXV

О РАДИОАКТИВНОСТИ СОЛЕЙ РАДИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С А. ДЕБЬЕРНОМ)

Мы показали раньше, что при помощи солей радия можно на некоторое время сообщить радиоактивные свойства любому телу, в частности дистиллированной воде.

Такую воду можно сделать радиоактивной разными способами. Можно, например, как уже указывалось, отделить путем дистилляции за несколько дней воду в полностью замкнутом сосуде из раствора хлористого радия; полученная таким путем дистиллированная вода сильно радиоактивна.

Второй еще более простой прием заключается в следующем: помещают в совершенно закрытый сосуд два кристаллизатора — один с раствором соли радия, другой с дистиллированной водой; по прошествии достаточного времени дистиллированная вода становится активной, причем передача радиоактивности происходит через газ, заключенный в сосуде.

Наконец, третий способ состоит в том, что раствор соли радия помещают в совершенно закрытую целлулоидную капсулу;[1] затем эту капсулу погружают в воду, подлежащую активизации; вода в свою очередь находится в закрытом сосуде. При этих условиях целлулоид играет роль идеальной полупроницаемой мембраны; даже малейшее количество раствора не проходит через стенки, тогда как активность раствора очень хорошо передается окружающей воде.[2]

Активируемая вода может приобрести достаточно сильную активность и даже в некоторых случаях более сильную, чем активность того тела, которым пользовались для сообщения ей радиоактивности. Будучи сохраняема в запаянной трубке, вода теряет за несколько дней большую часть своей активности; если же оставить ее в открытом сосуде, то потеря ак-

---

[1] Такую капсулу легко изготовить из листа целлулоида; края листка склеиваются ацетоном.

[2] Наведенная активность не может быть передана воздуху через сухую целлулоидную стенку, но она легко проходит через стенку, если увлажнить последнюю каплей воды.

тивности происходит значительно быстрее, и тем быстрее, чем больше поверхность соприкосновения с окружающим воздухом.

Растворы солей радия ведут себя аналогичным образом. Если оставить раствор в открытом сосуде, его активность значительно убывает, и это снижение можно произвольно усилить, увеличивая поверхность соприкосновения раствора с окружающим воздухом.[3] Однако в противоположность тому, что имеет место с активированной водой, потеря активности не окончательна; если поместить дезактивированный раствор в замкнутый сосуд, то он постепенно за десяток дней восстанавливает свою первоначальную активность.

Вот та теория, которая позволяет довольно хорошо согласовать между собой все эти явления радиоактивности: можно предположить, что каждый атом радия действует как непрерывный и постоянный источник радиоактивной энергии; при этом нет необходимости уточнять, откуда берется эта энергия.[4] Радиоактивная энергия, аккумулированная в теле радием, стремится рассеяться двумя различными способами: 1) путем излучения (лучи заряженные и не заряженные электричеством); 2) путем проводимости, т. е. путем постепенного переноса газом или жидкостью активности на окружающие тела (наведенная радиоактивность).

Потеря телом радиоактивной энергии как излучением, так и проводимостью тем больше, чем больше количество этой энергии запасено в теле. Тогда понятно, что неизбежно устанавливается равновесное состояние; аккумулируемая в теле радиоактивная энергия увеличивается до тех пор, пока двойная потеря, о которой мы говорили, не компенсирует непрерывного поступления, имеющего место в радии.

Такую точку зрения можно рассматривать как подобие точки зрения, используемой при изучении тепловых явлений. Если по каким-либо причинам внутри тела происходит непрерывное и постоянное выделение тепла, то последнее накапливается в теле и температура повышается до тех пор, пока потеря тепла телом через излучение и теплопроводность не уравновесит непрерывное поступление тепла.

Следуя этой аналогии, можно ввести понятие о напряжении радиоактивности, подобном температуре, и характеризовать его интенсивностью излучения (которое до сих пор мы рассматривали как меру интенсивности радиоактивности). Можно будет также определить и радиоемкость как аналог теплоемкости.

---

[3] Можно таким путем легко получить раствор в 500 раз менее активный, чем первоначальный.

[4] Эта энергия могла быть накоплена раньше; она может возникнуть благодаря изменениям, происходящим в самом радии; она может получиться благодаря неизвестному преобразованию внешнего излучения; наконец, она может быть заимствована из тепла в окружающей среде, вопреки принципу Карно (см. заметку г-жи Кюри: Revue générale des Sciences, janvier 1899).

Указанные теоретические соображения позволяют объяснить некоторые опыты.

Вообще говоря, за исключением некоторых особых условий, активность не передается через твердые тела. Если сохранять раствор в запаянной трубке, то потеря происходит только путем излучения и излучающая активность раствора принимает очень большую величину. Если же, наоборот, раствор находится в открытом сосуде, то тогда становится значительной потеря активности вследствие проводимости; когда режим установится, то излучательная активность раствора очень слаба.

Заметим далее, что излучательная активность твердых тел, находящихся на открытом воздухе, заметно не уменьшается, так как распространение радиоактивности путем проводимости не происходит через твердые тела, и только чрезвычайно тонкий поверхностный слой производит наведенную радиоактивность. Действительно, установлено, что растворение той же самой соли создает явления наведенной радиоактивности значительно более интенсивные (интенсивность возрастает приблизительно в 20 раз). У твердой соли радиоактивная энергия аккумулируется в соли и рассеивается почти только путем излучения. Наоборот, когда эта соль находится в растворе в продолжение нескольких дней, то радиоактивная энергия распределяется между солью и водой, и, если их разделить путем дистилляции, то вода уносит с собой большую часть активности, а твердая соль становится значительно менее активной (например, в 10 или 15 раз), чем она была до растворения.[5] Затем твердая соль постепенно приобретает свою первоначальную активность.

Сообщение солью радия активности воде раствора происходит достаточно медленно, и равновесие достигается только по истечении десятка дней; если, например, испарять раствор тотчас по его получении, то соль сохраняет значительную часть своей активности.



[5] Уменьшение активности впервые наблюдалось Гизелем (F. Giesel, Wied. Ann., 69, 91, 1899).

XXVI

О НАВЕДЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМОЙ СОЛЯМИ РАДИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С А. ДЕБЬЕРНОМ)

Известно, что все тела становятся радиоактивными, если их поместить в закрытый сосуд вместе с твердой солью бария, содержащего радий.[1] Эта так называемая наведенная радиоактивность возникает также, если заменить твердую соль радия ее водным раствором. Последний способ более предпочтителен, так как получаемые действия более закономерны и более интенсивны (примерно в 40 раз).

Различные твердые тела (медь, платина, свинец, олово, алюминий, стекло, бумага, воск, сернистый цинк и т. д.) приобретают одинаковую наведенную активность, если их поместить в те же условия и в том же активационном сосуде. Излучения этих активированных тел, так же как излучение самой соли радия, состоит из отклоняемых и неотклоняемых в магнитном поле лучей.

Наведенная активность не зависит от давления и природы газа, находящегося в активационном сосуде. Если производить активацию раствором соли бария, содержащего радий, при различных давлениях, то оказывается, что, начиная от атмосферного давления вплоть до давления насыщенных паров раствора, предельная активация одна и та же и что она идет со скоростью, не зависящей от давления. Если активирующее вещество есть твердая соль, то можно вести наблюдение как при атмосферном давлении, так и при очень совершенном вакууме (в последнем случае давление, измеренное манометром, было 2- или 3-тысячных миллиметра рт. ст.); в обоих случаях предельная активизация, по-видимому, была одна и та же.[2]

---

[1] P. Curie, A. Debierne, C. r., **132**, 548, 1901; **133**, 276, 1901. [Наст. изд., стр. 254 и 260].

[2] Пока мы создавали при помощи ртутного насоса такой высокий вакуум, сосуд частично дезактивировался, а потом, когда прерывали его связь с насосом, активность очень медленно восстанавливалась.

Некоторые вещества (соли, фосфоресцирующие под действием света, и ряд других) начинали светиться, будучи помещенными в активационный сосуд. В этом случае можно осуществить очень красивые эксперименты. Можно, например, в приборе, изображенном на рис. 1, поместить в первой колбе *B* раствор соли бария, содержащего несколько миллиграммов радия, а во второй колбе *B'* на дне ее расположить фосфоресцирующее вещество и обе колбы соединить между собой трубкой *T*.

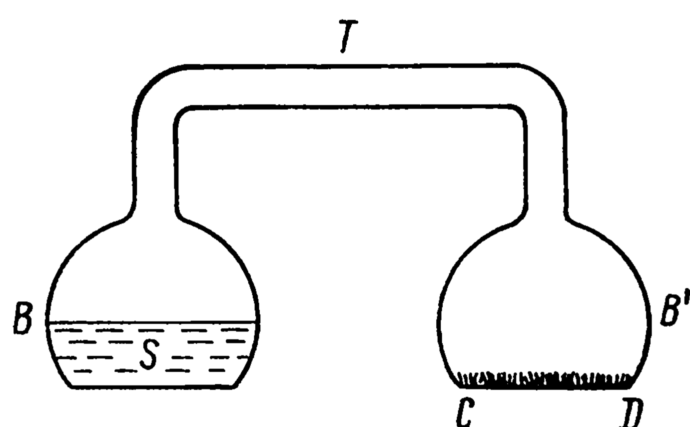


Рис. 1.

При этих условиях сернистый цинк фосфоресцирует особенно ярко: он светится так же ярко, как под воздействием на него сильного света, и это свечение остается постоянным, пока сохраняется связь сернистого цинка с радиоактивным раствором. Получаемое таким образом свечение обусловлено наведенной радиоактивностью, которая передается через трубку *T*, а не излучением радия. Сверх того, интенсивность лучей Беккереля, испускаемых активированным сернистым цинком в этом опыте, совершенно такая же, как и у меди или у любого другого вещества, помещенного при тех же условиях в колбу *B'*.[3]

Стекло также фосфоресцирует под действием наведенной радиоактивности (при этом тюрингское стекло светится более ярко, чем другие сорта стекла).

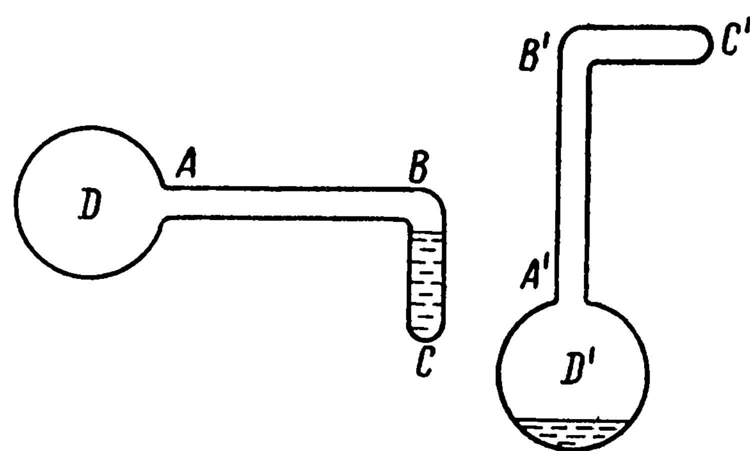


Рис. 2.

Наведенная активность тел, помещенных в активаторный сосуд, существенно зависит от свободного пространства около них. Если в таком сосуде помещать ряд параллельных между собой медных пластинок на расстоянии, все более и более увеличивающемся, то оказывается, что, пока расстояния между пластинками малы (например, 1 мм), обращенные друг к другу поверхности их активируются слабо. Наоборот, когда расстояния между пластинками велики (например, 3 см), обращенные друг к другу поверхности активируются сильно. Точные измерения затруднительны, но в первом приближении можно сказать, что активация этих пластинок, расположенных параллельно между собой, пропорциональна расстоянию, которое отделяет их друг от друга.

Если активационный сосуд стеклянный, то он весь светится, но не везде одинаково. Как общее правило, трубки, соединяющие части сосуда, светятся тем сильнее, и они тем более радиоактивны, чем они шире. В приборе

---

[3] Мы обязаны Вернейлю за предоставление нам прекрасного образца сернистого цинка, который был использован в наших опытах.

(рис. 1), когда равновесие достигнуто, стекло соединительной трубки T светится слабее и оно менее радиоактивно, чем стекло колб B и B'. Однако стенки этих двух одинаковых колб, соприкасающиеся с газом, светятся одинаково и одинаково радиоактивны; эта одинаковость их активности продолжается также и тогда, когда соединяющая их трубка очень длинна и очень узка.

Мы видим, что в одном и том же сосуде стенки его частей, имеющих тождественную форму, одинаково активны независимо от того, находятся ли они в непосредственной близости от активирующего раствора, или нет.

Таким образом, по-видимому, существует некоторая активирующая способность (pouvoir d'activation), распространенная по всему объему активационного сосуда и находящаяся в равновесии в различных его частях, но стенки активируются пропорционально величине свободного пространства перед ними.

Предельная активность в одном и том же сосуде зависит только от того количества радия, раствор которого введен в сосуд. Пусть два одинаковых стеклянных сосуда (рис. 2) содержат одинаковые количества одного и того же радиоактивного раствора; в первом сосуде раствор находится в узкой трубке BC, во втором сосуде — в колбе D'. Второй сосуд активируется сначала значительно быстрее, чем первый, но в конце концов, когда по истечению трех недель настанет равновесие, активность будет в обоих сосудах одинакова. Трубки AB и $A'B'$, с одной стороны, и колбы D и D' — с другой, становятся тогда одинаково активными и одинаково светятся.

Наконец, активность в сосуде возрастает, если увеличить количество активирующего раствора. Активирующая способность раствора все же не представляет собой аналога упругости пара.



XXVII

О РАДИОАКТИВНЫХ ТЕЛАХ [1]

(СОВМЕСТНО С Г-ЖОЙ М. КЮРИ)

В недавнем сообщении Беккерель предложил некоторые гипотезы о природе радиоактивных явлений [2], мы здесь изложим те идеи, которыми мы руководствовались в наших исследованиях.

Мы думаем, что во всяком физическом исследовании необходимым гипотезам полезно придавать очень общую форму.

С самого начала наших исследований мы приняли, что радиоактивность есть *атомное свойство* тел. Это предположение достаточно для выбора метода исследования радиоактивных элементов.[1]

Каждый атом радиоактивного тела действует как *постоянный источник энергии*. Из этой гипотезы можно вывести весьма различные следствия, которые могут быть подвергнуты экспериментальной проверке, и нет необходимости уточнять вопрос о том, откуда радиоактивное тело черпает эту энергию.

Исследования нескольких лет показали, что у урана, тория, радия, возможно также у актиния, радиоактивность остается строго неизменной всякий раз, как тело возвращается в прежнее физическое и химическое состояние; со временем эта активность не изменяется.[2]

Некоторые плохо истолкованные опыты могли бы привести к заключению о частичном уничтожении активности радия. Когда растворяют соль, содержащую радий, а затем вновь ее высушивают, то констатируют значительное снижение излучающей активности; однако постепенно в течение достаточно длительного времени (примерно 20 дней) в зависимости от условий опыта активность восстанавливается до своей первоначальной величины.

---

[1] M. Curie, Revue générale des Sciences, 30 janvier 1899.

[2] Полоний, наоборот, является исключением; его активность медленно уменьшается со временем. Это тело представляет собой род активного висмута; пока еще не показано, что он содержит какой-нибудь новый элемент. Полоний многим отличается от других радиоактивных тел; он не испускает отклоняемых магнитным полем лучей и не вызывает наведенной радиоактивности.

Если радиоактивную соль долго держать при температуре красного каления, а затем остудить до комнатной температуры, то радиоактивность становится слабее, чем до нагревания, однако постепенно и самопроизвольно ее первоначальная активность также восстанавливается (примерно по истечении 10 дней) [3].

В обоих случаях временное снижение излучения относится главным образом к проникающим лучам. Соль радия, нагретая до температуры красного каления, в значительной степени теряет способность вызывать наведенную радиоактивность, но, чтобы возвратить ей это свойство, достаточно заставить ее пройти через растворенное состояние.

По этому вопросу остается еще выполнить большое число исследований. Мы не имеем никакого представления о величине энергии, принимающей участие в явлениях радиоактивности, мы не знаем, ни по какому закону она рассеивается, ни по какому закону она изменяется при изменении физического и химического состояния излучающих тел.

Если пытаться установить происхождение радиоактивной энергии, то можно делать различные предположения, которые группируются около двух очень общих гипотез: 1) каждый радиоактивный атом обладает энергией, имеющей характер потенциальной энергии, которую он может выделить; 2) радиоактивный атом представляет собой механизм, способный в любой момент черпать вне себя ту энергию, которую он затем выделяет.

Согласно первой гипотезе потенциальная энергия радиоактивных тел должна в конце концов исчерпаться, хотя опыт нескольких лет не указал до сих пор на какие-либо изменения. Если, например, вместе с Круксом и Дж. Дж. Томсоном принять, что излучение типа катодных лучей материально, то тогда можно думать, что радиоактивные атомы находятся в процессе трансформации. Проведенные до сих пор поверочные опыты дали отрицательные результаты. По прошествии четырех месяцев не наблюдалось никакого изменения в весе радиоактивных веществ и никаких изменений состояния спектра.

Теории, высказанные Перреном и Беккерелем, являются также теориями атомной трансформации [3] [4]. Перрен уподобляет каждый атом планетной системе, некоторые отрицательно заряженные частицы которой могут вырываться. Беккерель объясняет наведенную радиоактивность постепенным и полным распадением атомов.

Согласно гипотезам второй группы, о которых мы говорили выше, радиоактивные тела представляют собой преобразователи энергии. Эта энергия, вопреки принципу Карно, могла бы быть заимствована из тепла окружающей среды, которая при этом будет охлаждаться. Она могла бы быть также заимствована из неизвестных источников, например из еще

---

[3] J. Perrin, Rev. scient., février 1901; H. Becquerel, C. r., 37, 9 décembre 1900.

неизвестной нам радиации. Вероятно, мы еще мало знаем об окружающей нас среде; наши знания ограничены явлениями, которые прямо или косвенно действуют на наши чувства.

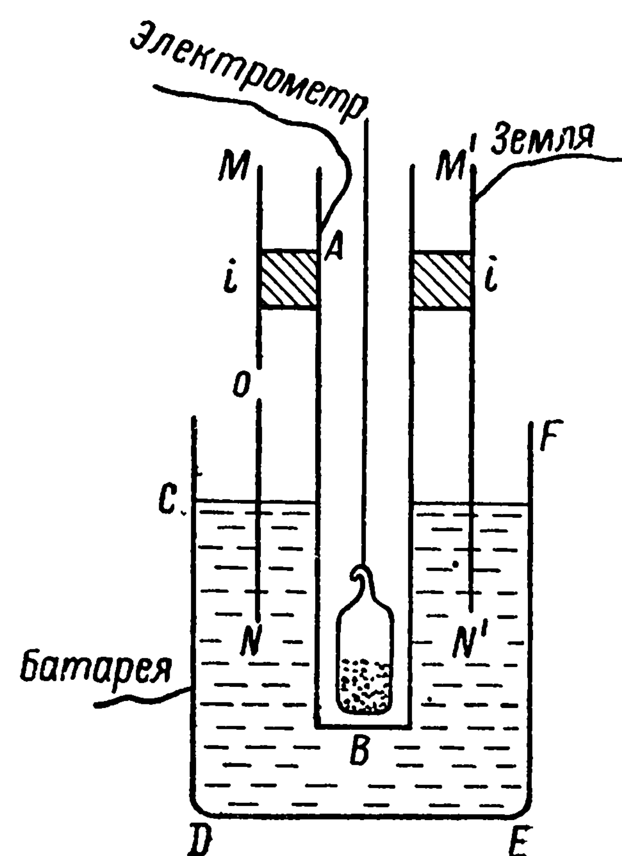
При изучении неизвестных явлений можно выдвигать гипотезы очень общего характера и продвигаться вперед шаг за шагом, прибегая к содействию опыта. Такой метод вполне надежен, но неизбежно замедлен. Но можно, наоборот, высказывать смелые гипотезы, в которых уточнен самый механизм явлений; такой образ действия имеет свои преимущества, поскольку он побуждает к постановке новых опытов, но главным образом он облегчает рассуждения, делая их менее отвлеченными вследствие использования образных представлений. Однако таким путем нельзя надеяться придумать à priori полную теорию, находящуюся в согласии с экспериментом. Такие очень подробные гипотезы могут одновременно содержать наряду с некоторыми ошибочными положениями также и некоторую долю истины. Эта последняя, если только она имеется, только и составляет часть некоторого более общего положения, к которому когда-нибудь надо будет вновь вернуться.



XXVIII

ПРОВОДИМОСТЬ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЛУЧЕЙ РАДИЯ И ЛУЧЕЙ РЕНТГЕНА [1]

Я обнаружил, что лучи радия и лучи Рентгена действуют на жидкие диэлектрики так же, как на воздух, сообщая им некоторую электрическую проводимость. Опыты я проводил следующим образом: исследуемая жидкость помещалась в металлический сосуд *CDEF*, в который опускалась трубка *AB* из тонкой меди; эти два металлических предмета служили электродами. Сосуд поддерживался при известном потенциале с помощью батареи маленьких аккумуляторов, один из полюсов которой был соединен с землей. Трубка *AB* была соединена с электрометром. Когда ток проходил через жидкость, электрометр удерживали на нуле при помощи пьезоэлектрического кварца, который дает значение силы тока. Медная трубка *MNM'N'*, соединенная с землей, служила охранной трубкой, чтобы избежать прохождения тока через воздух. Ампулка, содержащая соль бария с радием, могла быть помещена на дно трубки *AB*; лучи, пройдя через стекло ампулки и стенки металлической трубки, оказывали действие на жидкость. Можно было также заставить действовать радий, помещая ампулку под дном *DE*.



Чтобы и лучи Рентгена могли оказать свое действие, их пропускали через *DE*.

Увеличение электропроводности под действием лучей радия или лучей Рентгена, по-видимому, имеет место у всех жидких диэлектриков, но для определения этого увеличения необходимо, чтобы собственная проводи-

мость жидкости была в достаточной степени мала, дабы она не маскировала действия лучей.

Оперируя с радием и лучами Рентгена, я получил результаты одинакового порядка величины. При исследовании с той же установкой проводимости воздуха или какого-либо другого газа, возникающей под действием лучей Беккереля, было найдено, что при малых разностях потенциала на электродах (порядка нескольких вольт) сила тока растет пропорционально этой разности потенциалов. Но если постепенно повышать эту разность потенциалов, то сила тока не будет уже расти пропорционально ей; влияние увеличения напряжения начинает ослабевать и для высокого напряжения (100 в), при удвоении разности потенциалов сила тока возрастает только на очень малую долю своей величины.

Жидкости, исследованные с тем же прибором и с тем же сильно излучающим веществом, вели себя иначе; ток был пропорционален напряжению, когда последнее изменялось от 0 до 450 в, причем расстояние между электродами не превышало 6 мм.

Можно тогда исследовать *проводимость* различных жидкостей, вызываемую при одинаковых условиях излучением одной из солей радия. Числа следующей таблицы, умноженные на 10^{-14}, дают проводимость в $ом^{-1}$ на 1 $см^3$.

Сероуглерод	20
Петролейный эфир	15
Амилен	14
Хлористый углерод	8
Бензин	4
Жидкий воздух	1.3
Вазелиновое масло	1.6

Можно, однако, предположить, что жидкости и газы ведут себя аналогичным образом, но что у жидкостей ток остается пропорциональным напряжению вплоть до значительно более высокого предела, чем в случае газа; в серии указанных опытов закон пропорциональности не перестает соблюдаться для напряжений выше 450 в.

По аналогии с тем, что имеет место у газов, можно попытаться понизить этот предел пропорциональности, используя значительно более слабое излучение. Опыт подтвердил это предположение: были использованы препараты в 150 раз менее активные тех, которые применялись в первых опытах. Для напряжений в 50, 100, 200, 400 в я получил токи, которые могут быть представлены соответственно числами 109, 185, 255, 335. Хотя пропорциональности нет, но сила тока еще сильно изменяется при удвоении разности потенциалов.

Некоторые из исследованных жидкостей при устранении действия лучей и при поддержании их при постоянной температуре представляют собой почти совершенные изоляторы. Таковы жидкий воздух, петролейный эфир, вазелиновое масло, амилен. С этими жидкостями очень легко изучать действие лучей.

Вазелиновое масло заметно менее чувствительно к действию лучей, чем петролейный эфир. Может быть, следует сопоставить этот факт с различием летучести этих двух углеводородов. Жидкий воздух, некоторое время кипящий в сосуде, более чувствителен к действию лучей, чем только что налитый в сосуд; в первом случае проводимость, вызванная лучами, в четыре раза выше.

Я исследовал действие лучей на амилен и на петролейный эфир при температуре +10 и —17°. При переходе от +10 к —17° проводимость, вызываемая излучением, ослабляется только на $^1/_{10}$ своей величины.

В опытах, проводимых при разной температуре жидкости, можно применять радий, находящийся или при комнатной температуре, или при температуре жидкости; в обоих случаях получается один и тот же результат. Это обусловлено неизменностью излучения радия при изменении температуры; то же самое значение сохраняется даже при температуре жидкого воздуха, как это я непосредственно подтвердил измерениями [2].



XXIX

О ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩЕЙ ИСЧЕЗНОВЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ, НАВЕДЕННОЙ РАДИЕМ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ [1]

В своих предыдущих исследованиях мы, Дебьерн и я, изучали условия, при которых возникает наведенная радиоактивность.[1] В этом сообщении я рассматриваю вопрос о том, по какому закону исчезает наведенная радиоактивность, когда устраняется влияние радия.

Закрытый сосуд содержит твердую соль радия или ее раствор. Все тела, помещенные в этот сосуд, становятся радиоактивными. Если удалить из сосуда какое-либо активированное тело, то на открытом воздухе оно теряет свою активность по экспоненциальному закону, причем излучательная активность уменьшается наполовину по истечении времени порядка получаса [2].

Стеклянный сосуд активируется с внутренней стороны, если он сообщается трубкой с флаконом, содержащим соль радия. Можно отделить активированный радием сосуд, запаяв горелкой соединительную трубку; активность стенок отделенного таким образом закрытого сосуда также падает со временем, но по значительно менее быстрому экспоненциальному закону, чем при дезактивации [3] на свободном воздухе. Активность тогда уменьшается наполовину за 4 дня [4].

В этом втором опыте радиоактивный воздух заключен в сосуде; воздух поддерживает активность стенок. Можно удостовериться, что это действительно так; если открыть активированный сосуд и удалить заключающийся в нем воздух, то стенки сосуда начиная с этого момента быстро дезактивируются; активность падает до половины за время порядка получаса. Такой же закон дезактивации получается с замкнутым сосудом, если из него откачать воздух. Результат будет таким же, если

---

[1] P. Curie, A. Debierne, C. r., 132, 548, 768, 1901; 133, 276, 931, 1901. [Наст. изд., стр. 254, 256, 262 и 265].

после создания вакуума впустить неактивный воздух в сосуд, который затем закрывается.

Во всех случаях после удаления из трубки воздуха, подвергнутого действию радия, происходит быстрая дезактивация стенок.

В этом сообщении я рассматриваю только закон дезактивации закрытого сосуда, содержащего активированный газ.

Чаще всего в качестве замкнутого сосуда я пользовался стеклянной трубкой, запаянной на горелке. Эта стеклянная трубка помещалась внутри цилиндрического алюминиевого конденсатора. Лучи, испускаемые трубкой, проходят через алюминий и делают проводящим воздух между обкладками конденсатора. Измеряют предельный ток, получающийся между обкладками, когда между ними поддерживается постоянная разность потенциалов (450 в). Измеренное таким путем излучение обусловлено исключительно радиоактивностью стенок, так как, если быстро удалить активный воздух из трубки, то измеренное сразу после этого излучение было такое же, как и вначале.

Закон дезактивации запаянного сосуда исключительно прост. Интенсивность излучения I как функции времени t выражается экспоненциальным законом

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\theta}},$$

где I_0 — начальная интенсивность, e — основание неперовых логарифмов и θ — определенная постоянная, выражающая некоторое время.

Откладывая логарифм I по оси ординат и t по оси абсцисс, видим, что экспериментальные точки укладываются на прямую, причем отклонения не имеют систематического характера и не выходят за пределы ошибок наблюдений (1% величины I).

Некоторые серии наблюдений продолжались до 20 дней; интенсивность излучения в конце этого времени становилась в 27 раз слабее, чем в начале, и закон дезактивации всегда оказывался приложимым.

Я проводил опыты при совершенно различных условиях, и, несмотря на это, они все дали одно и то же значение для постоянной времени θ. Среднее значение, вытекающее из согласующихся между собой определений, полученных в 24 сериях наблюдений было $\theta = 4.970 \cdot 10^5$ сек. (5.752 дня).

Согласно этому значению θ, интенсивность излучения падает до половины за 3 дня 23 ч. 42 м., что близко к 4 дням.

Постоянная θ остается прежней: 1) если при активации трубок пользоваться солями радия весьма различной активности; 2) при пользовании для активации твердым хлористым радием; 3) при изменении размеров активационного сосуда (от 3 до 2000 см^3), а также его формы; 4) при изменении толщины стекла; 5) при пользовании вместо стеклянного сосуда сосудами с медными или алюминиевыми стенками; 6) пользуясь

при активации широкими и короткими трубками, либо длинными капиллярными; 7) при изменении продолжительности активации радием в пределах от 15 мин. до 1 месяца; 8) при активации под давлением воздуха, более слабым, чем атмосферное, вплоть до давления в 2 см рт. ст., оставляя трубку дезактироваться при этом пониженном давлении; 9) имея внутри активационной трубки водород или углекислый газ вместо воздуха.

Наконец, я работал при совершенно различных условиях, используя в качестве меры интенсивности активности силу электрического тока, проходящего между двумя электродами, расположенными внутри активационной трубки. Закон дезактивации оставался все тем же; между тем в этом случае измеряемая проводимость обусловлена одновременно радиоактивностью стенок и радиоактивностью газа, находящегося в сосуде.

Из этих многочисленных измерений следует, что постоянная времени, характеризующая уменьшение активности замкнутого активационного сосуда, не зависит ни от условий эксперимента, ни от природы газа, заполняющего сосуд, ни от материала стенок сосуда. Постоянная времени θ есть, таким образом, постоянная, не имеющая специфического характера, и поэтому она должна иметь общее значение.

Измерения этой постоянной были проведены в условиях, в которых, я полагаю, эта постоянная может быть определена с очень большой точностью.

В предыдущих сообщениях Дебьерн и я предполагали, что каждый атом радия ведет себя подобно некоторому источнику энергии, которая рассеивается либо путем излучения, либо путем постепенной проводимости в жидких и газообразных телах. Настоящие опыты показывают, что в газах эта энергия накапливается в какой-то особой форме, и рассеивается согласно экспоненциальному закону. Можно предполагать, что эта энергия расходуется, так как она идет на поддержание радиоактивности газа и стенок.





XXX

ОБ АБСОЛЮТНОМ ИЗМЕРЕНИИ ВРЕМЕНИ [1]

Кюри заметил, что явления радиоактивности, которые он последнее время изучал, дают возможность установить эталон времени. Если активировать воздух внутри стеклянной трубки с помощью некоторого раствора соли радия, то, запаяв эту трубку, можно затем убедиться, что излучение ее стенок уменьшается со временем, согласно экспоненциальному закону. Этот закон подтверждается для очень больших промежутков времени; интенсивность излучения уменьшается до половины своей величины в течение 4 дней (точнее за 3 дня 23 ч. 40 м.). Постоянная времени, определяемая этим явлением, одна и та же, каковы бы ни были природа и давление газа, каковы бы ни были природа и размеры стенок трубки, его заключающей, какова бы ни была температура (от —180 до +500°), каков бы ни был способ, которым была активирована эта трубка; время, определенное таким путем, не зависит от единиц, принятых для измерения других физических величин.



XXXI

О НАВЕДЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ И ОБ ЭМАНАЦИИ РАДИЯ [1]

В недавней работе [1] я изучал условия исчезновения наведенной радиоактивности в закрытом сосуде, подвергнутом действию радия и поддерживаемом при комнатной температуре. Интенсивность излучения *I* стенок сосуда уменьшается с течением времени согласно экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\theta}},$$

где $\theta = 4.97 \cdot 10^5$ сек. Интенсивность излучения уменьшается до половины за 4 дня. Я нашел, что закон дезактивации остается тем же самым, если вместо того, чтобы держать сосуд при комнатной температуре, ему сообщают температуру 450 или —180°.

Чтобы в этом убедиться, я провел сначала серию измерений с дезактивирующимися запаянными трубками при комнатной температуре; затем я поместил эти трубки на 3 дня в электрическую печь, имевшую температуру 450°. Трубки были затем возвращены к комнатной температуре. Измерялась их активность и было найдено, что полная потеря активности за время их пребывания в нагретом состоянии та же самая, что испытывает трубка за то же самое время при комнатной температуре. Я представил на рисунке результаты опытов, откладывая по оси ординат $\log I$, а по оси абсцисс — время *t*.

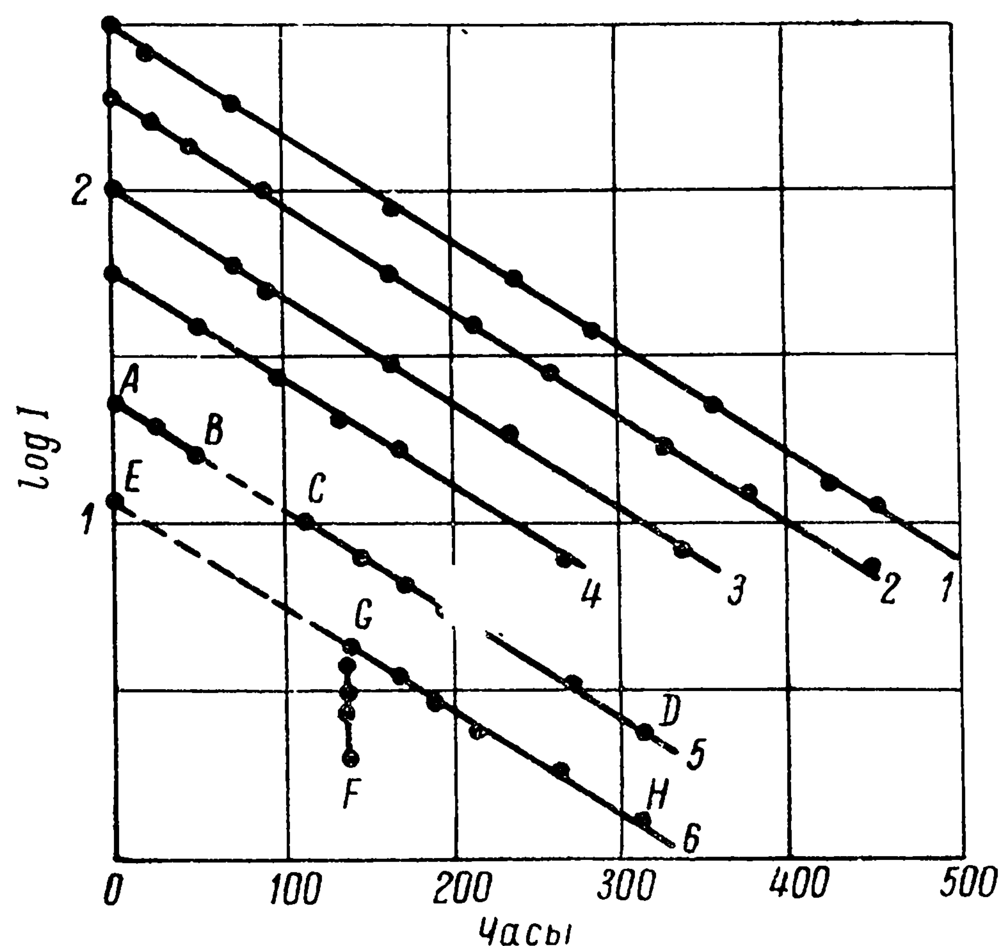
Кривые *1*, *2*, *3*, *4* относятся к четырем сериям опытов, проведенных при комнатной температуре. Все эти кривые суть параллельные между собой прямые, угловой коэффициент которых равен $-\frac{1}{\theta}$. Кривая *5* дает результат опыта при 450°: точки от *A* до *B* представляют собой измерения, проведенные до нагревания; точки от *C* до *D* — измерения, прове-

---

[1] P. Curie, C. r., 135, 857, 1902. [Наст. изд., стр. 274].

денные после нагревания. Все эти точки расположены на одной и той же прямой, параллельной предыдущим четырем прямым.

В другом опыте те же трубки были охлаждены жидким воздухом до —180°. Точка E на кривой *6* изображает первое измерение, проведенное при комнатной температуре. Затем трубка оставалась погруженной в жидкий воздух в течение 6 дней. После этого измерения были вновь произведены при комнатной температуре. Первое измерение (точка F), проведенное непосредственно после нагревания трубки, дало для интенсивности излучения величину в два раза меньшую, чем та, которая бы имела место, если бы трубка все время оставалась при комнатной температуре. Но затем активность трубки быстро возрастала в течение приблизительно получаса (точки между F и G).



Измерения, проведенные затем (от G до H), дали значения, которые бы имели место, если бы трубки все время оставались при комнатной температуре. Прямая GH, будучи продолженной, проходит через точку E; эта прямая имеет тот же наклон, что и прямые *1*, *2*, *3*, *4*.

Таким образом, после возвращения к температуре окружающей среды имеет место некоторое нарушение, которое можно приписать мгновенному изменению излучения стеклянной оболочки вследствие охлаждения. Но после этого обычный закон спадания интенсивности восстанавливается.

Можно предположить, что энергия, содержащаяся в сосуде и поддерживающая активность стенок, уменьшается с течением времени, следуя закону, независимому от температуры в пределах от —180 до +450°. Я, впрочем, показал, что этот закон также не зависит от различных других условий, при которых производились эксперименты (природа и давление газа, материал стенок и т. д.).

Энергия, производимая каждым атомом радия, рассеивается излучением или благодаря проводимости в телах. Последние опыты показывают, что в газах энергия постепенно переносится и накопляется в особой форме, которая, рассеиваясь соответственно экспоненциальному закону, вызывает радиоактивность материальных тел.

Для объяснения явлений наведенной радиоактивности и переноса активности потоками газов, Резерфорд предположил, что торий и радий испускают *радиоактивную эманацию*, вызывающую радиоактивность тех

тел, на которых она оседает. Это та эманация, которая поддерживает наведенную активность в закрытом активируемом сосуде. Резерфорд, по-видимому, верит в материальную природу эманации; в одном из последних своих мемуаров [2] он считает правдоподобным предположение, что здесь дело идет о газе, принадлежащем к группе аргона.

Я думаю, что в действительности нет достаточных оснований признавать существование эманации материи в ее обычной форме в виде атомов. Мы, Дебьерн и я, раньше напрасно искали новые спектральные линии в радиоактивном газе, выделяемом радием [[2]]. В конце концов эманация самопроизвольно исчезает в запаянной трубке. Я считаю также маловероятным, чтобы явления, сопровождающие эманацию, происходили в результате каких-то химических превращений. В самом деле, неизвестно ни одной химической реакции, скорость которой была бы независимой от температуры между —180 и +450°.

Выражение «эманация» удобно, и Резерфорд постоянно пользуется им в своих многочисленных и ценных мемуарах, относящихся к наведенной радиоактивности. Я также буду пользоваться этим названием, которое для меня означает *радиоактивную энергию, излучаемую радиоактивными телами в той ее особой форме, в которой она накапливается как в газе, так и в пустоте*. Эта особая форма энергии в случае радия существенно *характеризуется постоянной времени*, входящей в экспоненциальный закон, следуя которому энергия рассеивается. Радиоактивность твердых стенок представляет собой другой вид этой радиоактивной энергии, которая рассеивается согласно другому закону.

Можно дать такую теорию радиоактивности: радий сам по себе не испускает лучей Беккереля, он излучает только эманацию. В твердых солях радия эманация, не имея возможности выделиться, трансформируется в лучи Беккереля. В случае же раствора, помещенного в какой-либо сосуд, эманация в нем распространяется и вызывает радиоактивность стенок; излучение проявляется во вне.

Важный вопрос, который надо выяснить, состоит в том, чтобы знать, каков носитель энергии, составляющей эманацию. Несмотря на высказанные выше возражения, можно вместе с Резерфордом предположить, что радий испускает газ, играющий роль переносчика эманации. Можно также приписать эту роль носителя эманации тому газу, который находится в пространстве, по которому распространяется эманация; но тогда трудно понять, почему природа газа, его температура и давление не оказывают влияния на свойства эманации. Остается третья гипотеза, которая заключается в предположении, что эманация не имеет в качестве носителя обычную материю и что существуют центры конденсации энергии, расположенные между молекулами газа, увлекаемые вместе с этими последними.

---

[2] R. Rutherford, Phil. Mag., 4, 566, 1902.

XXXII

ОБ ИСЧЕЗНОВЕНИИ РАДИОАКТИВНОСТИ, НАВЕДЕННОЙ РАДИЕМ НА ТВЕРДЫЕ ТЕЛА [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. ДАННОМ [2])

Все твердые тела, подвергнутые действию эманации радия в закрытом сосуде, активируются одинаково. Будучи удалены из сосуда и таким образом устранены от действия эманации, они относительно быстро дезактивируются по закону, который будет предметом настоящего сообщения.

Закон убывания активности излучения остается тем же самым, какова бы ни была длительность пребывания тела в замкнутом сосуде, лишь бы это пребывание было достаточно продолжительно (активация продолжалась бы более 24 час.). Вообще говоря, природа тела не играет роли; в одних и тех же условиях тела активируются и дезактивируются совершенно одинаково.

Закон дезактивации представлен кривой *1* (жирная черта) на рис. 1 и 2. Время отсчитывается с момента удаления пластинки из сосуда. Это время откладывается по оси абсцисс, а логарифм интенсивности излучения по оси ординат. Как видно из рисунков, кривая, передающая явление, становится почти прямолинейной после 2 ч. 30 м. дезактивации. Начиная с этого момента интенсивность I излучения падает в зависимости от времени согласно экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\theta_1}},$$

где $\theta_1 = 2420$ сек.

Активность уменьшается вдвое за 28 мин. Мы рассматриваем этот закон убывания активности как характеризующий ту форму, в которой радиоактивная энергия накапливается у поверхности твердых тел.

Интенсивность излучения в произвольный момент может быть представлена разностью двух экспоненциальных функций

$$I = I_0 \left[a e^{-\frac{t}{\theta_1}} - (a-1) e^{-\frac{t}{\theta_2}} \right],$$

где I_0 — начальная интенсивность, $\theta_1=2420$ сек., т. е. постоянная времени, указанная выше, а $\theta_2=1860$ сек. — новая постоянная времени. Численный коэффициент $a=4.20$.

Радиоактивная энергия исчезает быстрее, если она находится в той же форме, которую она имеет на твердом активированном теле, чем тогда, когда она находится в форме эманации. В последнем случае она уменьшается до половины за 4 дня [3].

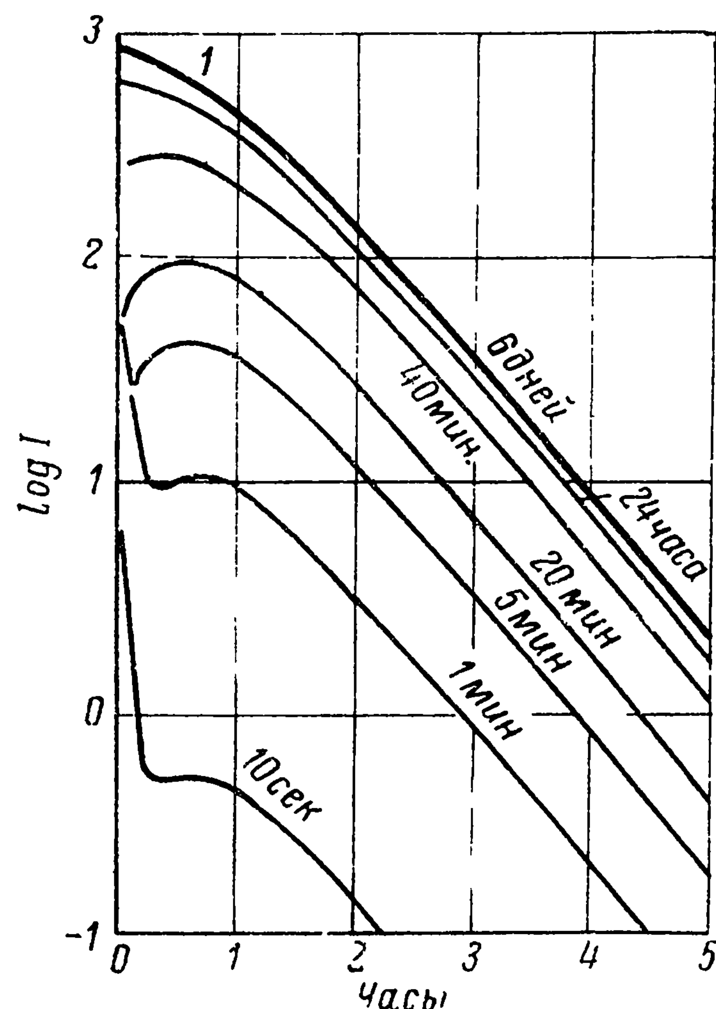


Рис. 1.

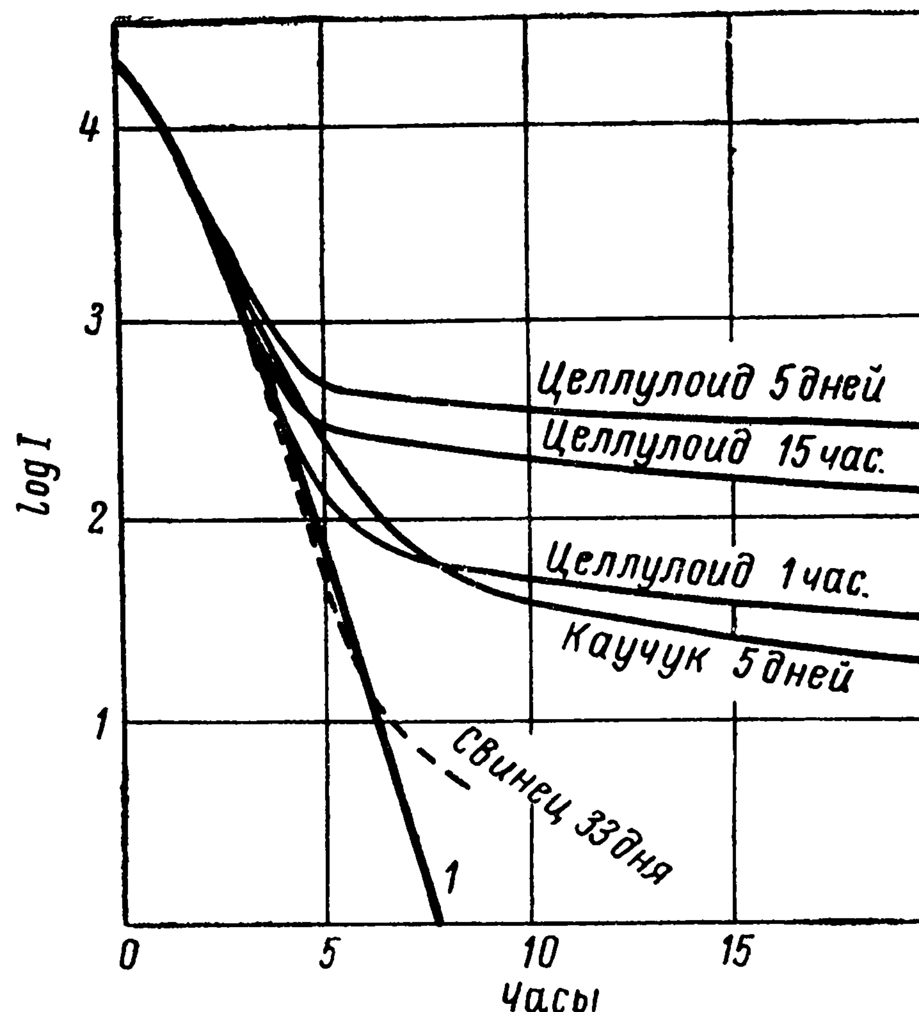


Рис. 2.

Когда продолжительность активации меньше 24 час., то закон дезактивации в течение первых часов сильно изменяется; это показывают кривые рис. 1, представляющие дезактивацию.

Время пребывания в закрытом активационном сосуде обозначено у каждой кривой.[1]

При активации, продолжающейся, например, 5 мин., интенсивность излучения после резкого падения проходит через минимум ($t=8$ мин.), затем растет до максимума ($t=40$ мин.) и затем уже падает закономерно. На рисунках видно, как меняется закон дезактивации в зависимости от времени активации. Во всех случаях закон дезактивации в конце концов по истечении 2 ч. 30 м. становится обычным экспоненциальным законом, причем спадание до половины происходит за 28 мин. Кривая *1*, представляющая закон дезактивации после длительной экспозиции под действием эманации, есть предельная нормальная кривая.

[1] E. Rutherford, Phys. Zs., **3**, 210, 1902. — В этой статье Резерфорд уже отмечал аномалии в начале кривой дезактивации [4].

Если активировать твердое тело, *быстро* приводя его в соприкосновение с эманацией радия, то его излучение I будет устанавливаться постепенно и стремиться к предельному значению I_1. В этом случае кривая $\log (I_1 - I)$, как функция времени, становится тождественной с кривой *1*. *Таким образом, как в случае активации пластинки, так и в случае ее дезактивации, излучение стремится к своему предельному значению, следуя одному и тому же закону.* Активированные тела по удалении их из активационного сосуда сами испускают в течение некоторого времени радиоактивную эманацию, способную активировать другие находящиеся по соседству тела. Это свойство довольно быстро теряется и не обнаруживается более в течение одного или двух часов, хотя активность пластинок еще весьма значительна. Это явление, по-видимому, не играет принципиальной роли при дезактивации пластинок. Может быть, все дело здесь в присутствии и в преобразовании некоторого количества эманации, в которых надо искать причину особенностей кривых, соответствующих началу дезактивации.

Мы видели, что в общем закон дезактивации не зависит от природы активируемых тел: алюминий, медь, свинец, висмут, платина, серебро, стекло, квасцы, парафин — все ведут себя одинаково. Однако для некоторых тел, подвергнутых продолжительной активации, окончательный экспоненциальный закон дезактивации уже более не применим. По истечении нескольких часов активность падает, только очень медленно, и необходимо иногда несколько дней, чтобы уменьшить ее вдвое. Это явление особенно отчетливо выражено у целлулоида и каучука. На парафине и воске оно сказывается слабее; оно заметно даже у квасцов и свинца. На рис. 2 видно, насколько эти кривые отклоняются от кривой нормального хода дезактивации (чтобы сделать кривые сравнимыми, при их построении было предположено, что интенсивность излучения была одна и та же по истечении 1 часа с начала дезактивации). Целлулоид сверх того обладает свойством испускать эманации в течение многих дней, однако дело кончается тем, что он полностью дезактивируется.



XXXIII

О ТЕПЛОТЕ, САМОПРОИЗВОЛЬНО ВЫДЕЛЯЕМОЙ СОЛЯМИ РАДИЯ [1]

(СОВМЕСТНО С А. ЛАБОРДОМ) [2]

Мы нашли, что соли радия непрерывно выделяют теплоту [3]. С помощью железо-константановой термоэлектрической пары, один спай которой был окружен хлористым барием, содержащим радий, а другой — чистым хлористым барием, мы обнаружили некоторую разность температур между этими двумя телами.

Мы проделали опыт с двумя маленькими одинаковыми ампулками, в одной из которых был помещен 1 г хлористого бария с радием, содержащим около $^1/_6$ по весу хлористого радия, а в другой — 1 г чистого хлористого бария. Спаи термоэлектрической пары были помещены в центре каждой из ампулок внутри заполняющих их веществ. Эти ампулки были изолированы и помещены в середину двух одинаковых маленьких сосудов, расположенных в свою очередь в третьем сосуде, который был теплоизолирован и в котором сохранялась почти равномерная температура. При таких условиях изменения комнатной температуры должны были бы ощущаться совершенно одинаково обоими спаями и не влиять на показания термопары.

Таким путем мы установили разность температур в 1.5° между хлористым барием, содержащим радий, и чистым хлористым барием, причем соль, содержащая радий, имела более высокую температуру. Для контроля мы повторили тот же опыт в тех же самых условиях с двумя ампулками, содержащими только чистый хлористый барий. Наблюденные при этом разности температур были порядка $^1/_{100}$ градуса.

Мы попытались количественно оценить теплоту, выделяемую радием за определенное время. С этой целью мы прежде всего сравнили указанное количество тепла с тем, что выделяет электрический ток известной силы в проволоке известного сопротивления.

Ампулка, содержащая радий, помещалась внутри металлического блока, которому она сообщила свое тепло. Один из спаев термоэлектри-

ческой пары находился в углублении, высверленном в этом блоке; другой спай был помещен в другом таком же блоке, не содержащем радия. При наступлении равновесия первый блок получает от радия в определенное время столько тепла, сколько он теряет в окружающей среде вследствие проводимости и излучения. Термопара указывает, таким образом, определенную разность температур между обоими блоками.

Проделав этот опыт, мы заменили ампулку, содержащую радий, ампулой, в которой находилась тонкая проволока из иридированной пластины, которую нагревали, пропуская через нее ток. Мы изменяли силу тока до тех пор, пока не установится равновесное состояние с той же разностью температур обоих блоков, что и в предыдущем опыте.

Теплота, выделяемая радием в первом опыте, равна тогда теплоте, выделяемой за то же время током во втором опыте. Это последнее количество тепла легко вычислить.

Далее мы определили количество тепла, выделяемое радием, прямым измерением при помощи калориметра Бунзена.

Перед тем как произвести этот опыт, необходимо убедиться, что уровень ртути в капиллярной трубке калориметра остается строго неподвижным.

Ампулка, содержащая радий, находилась в течение этого времени в трубке, поддерживаемой при температуре 0° в тающем льде. В некоторый момент ампулку вводили в калориметр и констатировали, что ртуть в трубке перемещается с совершенно постоянной скоростью (например, по 2.3 см в час для указанного выше содержимого трубки). Если удалить ампулку, содержащую радий, столбик ртути тотчас останавливается.

1 г хлористого бария с радием, с которым мы производили большинство этих опытов, выделил приблизительно 14 малых калорий в час, однако состав этого препарата нам в точности неизвестен. По активности своего излучения он должен содержать около $^1/_6$ своего веса чистого хлористого бария. Мы проделали также несколько измерений с образцом, содержащим 0.08 г чистого хлористого радия. Измерения, выполненные обоими методами, привели к результатам, имеющим тот же порядок величины, но не совпадающим абсолютно. В этих первых исследованиях мы ставили себе целью только показать неопровержимым образом существование выделения тепла, действуя в различных условиях, и установить порядок величины явления.

1 г радия выделяет количество тепла порядка 100 малых калорий за один час.

1 грамм-атом радия (225 г) выделял бы за каждый час 22 500 кал. Это число сравнимо с тем количеством тепла, которое выделяется при сгорании 1 грамм-атома водорода в кислороде.

Непрерывное выделение такого количества тепла не может быть объяснено обычным химическим превращением. Если искать причину

образования тепла в каких-то внутренних превращениях, то эти превращения должны быть более сложной природы и должны быть вызваны какими-то изменениями самого атома радия. Вместе с тем подобное превращение, если оно существует, протекает чрезвычайно медленно. Действительно, свойства радия не испытывают заметных изменений в течение нескольких лет, и Демарсэ не мог обнаружить никакой разницы в спектре одного и того же образца хлористого радия, проведя два испытания через промежуток времени в 5 месяцев. Если, однако, предыдущая гипотеза верна, то величина энергии, участвующая в этом превращении атомов, исключительно велика.

Гипотеза о непрерывном видоизменении атома не является единственной, совместимой с указанным выделением тепла радием. Это выделение тепла может быть также объяснено, если предположить, что радий использует внешнюю энергию каким-то неизвестным образом.



XXXIV

ОБ ЭМАНАЦИИ РАДИЯ И ЕЕ КОЭФФИЦИЕНТЕ ДИФФУЗИИ В ВОЗДУХЕ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. ДАННОМ)

При исследовании лучей Беккереля, испускаемых стенками стеклянного сосуда, запаянного на горелке и содержащего эманацию радия (т. е. содержащего воздух, активированный раствором соли радия), можно убедиться, что интенсивность I излучения сосуда уменьшается со временем t по экспоненциальному закону. Активность уменьшается вдвое в течение 4 дней; мы имеем

$$I = I_0 e^{-bt} \text{ или } \frac{dI}{dt} = -bI,$$

где $b = 2.01 \cdot 10^{-6}$ сек.$^{-1}$.

Можно повторить указанный опыт со стеклянным сосудом, который не запаивается, но сообщается с атмосферой через стеклянную капиллярную трубку. В этом случае оказывается, что интенсивность излучения уменьшается более быстро, чем в первом случае, но всегда согласно экспоненциальному закону, который характеризуется коэффициентом b', бо́льшим, чем b. В этом опыте часть эманации вытекает через капиллярную трубку и разность $b' - b = a$ характеризует это истечение. Можно принять, что излучение стенок сосуда пропорционально количеству эманации, которое в нем содержится. Тогда экспоненциальный закон указывает, что скорость истечения эманации через капиллярную трубку пропорциональна количеству эманации, находящейся в сосуде.

Мы нашли, что коэффициент a изменяется пропорционально сечению s капиллярной трубки, обратно пропорционально длине l трубки и обратно пропорционально объему v сосуда и он не зависит от формы последнего.

Таким образом,

$$a = \frac{Ks}{lv},$$

где K — коэффициент, характеризующий диффузию эманации в воздух. При атмосферном давлении и при температуре, близкой к 10°

$$K = 0.100 \text{ единиц CGS.}$$

Закон, касающийся длины капиллярной трубки, оправдывается очень хорошо; закон, относящийся к поперечному сечению, оправдывается также удовлетворительно; однако, по-видимому, скорость истечения растет с ростом поперечного сечения не так быстро, как само сечение. Следующая таблица содержит результаты опытов (d — диаметр капиллярной трубки):

d	l	v	$10^6 b$	$10^6 a$	K
0.0426	2.8	7.8	11.12	9.11	0.139?
0.0426	5.4	7.8	6.13	4.12	0.122?
0.0426	13.0	7.1	4.12	2.11	0.137?
0.0951	10.0	6.25	14.70	12.69	0.112
0.0956	13.4	6.25	11.25	9.24	0.108
0.0966	35.2	6.25	5.69	3.68	0.110
0.132	34.1	6.2	8.73	6.72	0.104
0.131	37.7	12.3	5.13	3.12	0.106
0.143	19.0	13.7	8.22	6.21	0.101
0.143	33.1	13.7	5.54	3.53	0.095
0.167	4.5	12.3	43.40	41.39	0.105
0.167	9.8	12.3	20.95	18.94	0.104
0.167	18.8	12.3	11.50	9.49	0.100
0.167	37.2	12.3	7.10	5.09	0.106
0.189	7.3	23.9	18.30	16.29	0.101
0.192	14.8	23.9	10.22	8.21	0.100
0.196	33.8	23.9	5.57	3.56	0.094
0.285	15.9	13.75	30.65	28.64	0.098
0.285	22.4	13.75	22.35	20.34	0.098
0.283	35.6	13.75	14.19	12.18	0.095
0.290	38.0	13.34	15.14	13.13	0.100
0.292	18.2	6.2	57.80	55.79	0.094
0.406	21.4	26.8	25.60	23.59	0.104
0.412	46.5	26.8	12.56	10.55	0.099

Согласно предыдущим законам, эманация диффундирует как некоторый газ, примешанный к воздуху в малой пропорции. Тогда коэффициент K представляет собой коэффициент диффузии этого газа в воздухе. Этот коэффициент близок к коэффициентам, найденным для некоторых газов. Таковой, относящийся к углекислому газу в воздухе при 10°, равен приблизительно 0.15, для паров эфира в воздухе — приблизительно 0.09.

Можно, впрочем, заметить, что коэффициент диффузии эманации радия в воздухе гораздо легче измерить, чем коэффициент диффузии какого-либо газа, так как излучение сосуда в любой момент указывает на то количество эманации, которое в нем содержится [2].

Резерфорд и мисс Брукс уже провели опыт для определения коэффициента диффузии эманации радия в воздухе.[1] Они предположили a priori, что эманация ведет себя, как газ, и определили ее коэффициент диффузии по методу Лошмидта. Они нашли, что коэффициент диффузии в воздухе близок к 0.08; результат, сходный с нашими измерениями.

Мы убедились, что и при других обстоятельствах эманация радия ведет себя, как газ.

1. Сосуд объемом v_1, содержащий эманацию, испускает излучение J; его связывают с другим неактивным сосудом объема v_2; часть эманации переходит в этот второй сосуд, но равновесие устанавливается только по прошествии некоторого времени t. В течение этого времени эманация уменьшилась в известной нам пропорции. Пусть J' есть интенсивность, которая будет иметь место в первом сосуде к моменту времени t, если связь со вторым сосудом еще не установлена. Пусть J_1 есть интенсивность к моменту t.

Найдено, что

$$\frac{J_1}{J'} = \frac{v_1}{v_1 + v_2},$$

т. е. эманация распределяется между двумя сосудами пропорционально их объемам. Опыт дает тот же результат при различных степенях разрежения.

2. Два сосуда активированы и сообщаются между собой с помощью стеклянной трубки. Один сосуд держат при 350°, другой остается при температуре 10°. Активность излучения трубки, остающейся холодной, увеличивается; обнаруживается, что эманация распределяется между двумя сосудами в той же пропорции, как и массы газа в тех же условиях. Резерфорд установил, что эманация радия конденсируется при температуре жидкого воздуха; это важное обстоятельство мы подтвердили следующим опытом:

Стеклянный резервуар, занимающий большой объем, содержит эманацию радия; этот резервуар кончается капиллярной трубкой. Если погрузить эту трубку в жидкий воздух, то вся эманация сконденсируется. Если отпаять на горелке капиллярную трубку, то можно убедиться, что большой сосуд становится неактивным и маленькая капиллярная трубка становится очень активной и содержит всю эманацию.



[1] E. Rutherford, H. T. Brooks, Chem. News, 25 april, 1902.

XXXV

ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ [1]

После открытия сильно радиоактивных веществ исследование радиоактивности получило очень большое развитие. В настоящей статье я предполагаю сделать сводку современного состояния наших знаний, относящихся к этому предмету, делая особый упор на результатах самых последних работ [1] [2].

I. Радиоактивные вещества

Лучи Беккереля. Уран и торий. Мы будем называть *радиоактивными* вещества, способные самопроизвольно и непрерывно испускать особые лучи, называемые *лучами Беккереля.* Эти лучи действуют на фотографические пластинки; они делают газ, через который они проходят, проводником электричества; они способны проникать через черную бумагу и металлы. Лучи Беккереля не отражаются, не преломляются и не поляризуются.

Беккерель в 1896 г. открыл, что *уран* и его соединения непрерывно испускают эти новые лучи. Затем почти одновременно Шмидт и г-жа Кюри нашли, что соединения *тория* также радиоактивны. Интенсивность излучений, испускаемых соединениями тория, аналогична таковой излучений, испускаемых соединениями урана. Радиоактивность есть атомное свойство, сопровождающее атомы урана и тория всюду, где они находятся; в соединениях и в смесях радиоактивность, вообще говоря, тем сильнее, чем больше в них содержание этих двух металлов.

Новые радиоактивные вещества. Г-жа Кюри в 1898 г. занялась исследованием вопроса, существуют ли между известными тогда простыми телами такие, которые наделены радиоактивными свойствами; она

---

[1] Более подробное и полное изложение работ до мая 1903 г. см. в диссертации г-жи Кюри (Paris, Gauthier-Villars, juin 1903). Эта работа будет опубликована в «Annales de chimie et de physique» в 1903—1904 гг. [Ann. de chim. et de phys., 30, 1903].

не могла найти ни одного такого вещества, создающего заметное излучение, и она смогла заключить, что радиоактивность простых тел по меньшей мере в 100 раз слабее радиоактивности урана и тория. Она, однако, нашла, что некоторые минералы, содержащие уран (смоляная руда, халколит, карнотит), *более активны*, чем металлический уран; активность этих минералов не может быть приписана исключительно ни урану, ни другим известным простым телам. Это открытие привело к новым результатам. Мы, г-жа Кюри и я, в работе, проведенной совместно, установили, что смоляная руда содержит в себе новые радиоактивные вещества и предположили, что эти вещества содержат новые химические элементы.

В настоящее время известно три новых сильно радиоактивных вещества: *полоний*, который находится в висмуте, выделенном из минералов урана, *радий*,[2] находящийся в барии того же происхождения, и *актиний*, найденный Дебьерном в составе редких земель, выделенных им из тех же минералов. Все эти три вещества находятся в урановых минералах в исчезающе малых количествах и все три обладают радиоактивностью приблизительно в миллион раз более сильной, чем радиоактивность урана и тория.

Недавно Гизель и Гоффман указали на присутствие в минералах урана четвертого сильно радиоактивного вещества, которое по своим химическим свойствам аналогично свинцу; опубликованные до сих пор работы не дают мне возможности составить определенное мнение о природе этого вещества.

Можно спросить, не является ли радиоактивность некоторым общим свойством материи. Этот вопрос не может считаться в настоящее время решенным. Исследования г-жи Кюри показали, что различные известные вещества не обладают такой атомной радиоактивностью, которая бы достигала сотой доли радиоактивности урана и тория. С другой стороны, некоторые химические реакции могут вызывать появление ионов проводников электричества без того, чтобы это активное вещество имело характер атомной радиоактивности. Так, белый фосфор при окислении делает окружающий его воздух проводником электричества, тогда как красный фосфор и фосфаты не обнаруживают никакой радиоактивности.

Довольно старые опыты (Руссель, Колсон, Лангиель) показали, что некоторые тела при длительной экспозиции действуют на фотографические пластинки. Возможно, что это явление частично связано с радиоактивностью, однако по этому предмету нет ничего достоверного. Последние работы (Мак Ленан и Бартон, Стрэт, Лестер Кук) заставляют, однако, предполагать, что радиоактивность в чрезвычайно слабой степени есть свойство, присущее всем веществам. Тождественность этих очень слабых

[2] Открыт г-ном и г-жой Кюри и г-ном Бемонтом.

явлений с явлениями атомной радиоактивности не может еще пока рассматриваться как несомненная.

Радий. Из всех сильно радиоактивных веществ радий — единственное вещество, относительно которого удалось установить, что он представляет собой новый элемент. Радий обладает характерным спектром, который был открыт и впервые изучен Демарсэ и затем исследован Рунге и Прехтом, а также Круксом. Радий есть элемент, который приходится поместить в ряду щелочноземельных металлов вслед за барием; его атомный вес, определенный г-жой Кюри, равен 225.

Радий до сих пор извлекался из остатков производства, имеющего своей целью извлечение урана из его минерала (смоляной руды). Каждая тонна этого остатка содержит от 0.2 до 0.3 г радия. Начинают с выделения из 1 т отходов от 10 до 15 кг солей бария, содержащих радий, из которых затем выделяют путем фракционной кристаллизации (хлористыми или бромистыми соединениями) соль радия, причем кристаллы, выделяющиеся из раствора, более богаты радием, чем соль, остающаяся в растворе.

Можно измерять излучающую активность соли радия в разные моменты времени, начиная с момента, когда производят кристаллизацию этой соли или когда ее высушивают в печи. Установлено, что активность имеет некоторое начальное значение, затем она увеличивается со временем, сначала быстро, а потом все медленнее и медленнее; она асимптотически стремится к некоторому предельному значению, которое приблизительно в 5 раз больше первоначальной активности. Затем активность остается неизменной в течение ряда лет, если сохранять эту соль в неизменном состоянии.

Полоний. Полоний, наоборот, представляет собой тело, медленно теряющее свою радиоактивность после того, как оно было выделено из содержавших его урановых минералов. По прошествии нескольких лет радиоактивность полония почти полностью пропадает. Таким образом, полоний ведет себя как нестабильное тело. Пока еще не удалось показать, что полоний представляет собой новый элемент, отличающийся от обыкновенного висмута.

Полоний можно обогатить путем фракционирования, осаждая водой азотнокислый висмут с полонием в кислом растворе; выделенная в осадке соль более активна. Можно также провести частичное осаждение очень крепкого раствора соляной кислоты сероводородом; полоний сосредоточивается в осадке. Процессы фракционирования очень трудоемки, так как раз осажденные продукты вновь растворяются с большим трудом. Марквальд усиливал активность, погружая палочку висмута в раствор висмута с полонием; на этой палочке осаждался слой чрезвычайно активного металла.

Актиний. Обогащение актиния еще более трудно, чем полония. Твердые соли, заключающие в себе актиний, обладают радиоактивностью, остающейся совершенно неизменной в продолжение нескольких лет

II. Излучение радиоактивных тел

Сложный состав излучения. Радий есть радиоактивное тело, излучение которого изучено наиболее полно. В настоящее время известно, что радий испускает целую совокупность лучей разной природы, которые можно разделить на три группы. По примеру Резерфорда я буду обозначать эти три группы лучей буквами α, β, γ.

Различить их позволяет действие на них магнитного поля. В сильном магнитном поле α-лучи слабо отклоняются от прямолинейного пути, отклонение происходит в ту же сторону, что и в случае *каналовых лучей* Гольдштейна в пустотных трубках; наоборот, β-лучи отклоняются как катодные лучи, γ-лучи совсем не отклоняются и ведут себя как лучи Рентгена.

β-*Лучи.* β-Лучи радия, аналогичные катодным лучам, образуют неоднородную группу; они отличаются друг от друга по их проникающей способности и по тому отклонению, которое они испытывают в магнитном поле.

Некоторые из β-лучей поглощаются пластинкой алюминия толщиной в несколько сотых миллиметра, тогда как другие свободно проходят, рассеиваясь слоем свинца в несколько миллиметров.

Предположим, что с помощью маленькой крупинки соли радия и с помощью экрана с отверстием осуществлен прямолинейный пучок лучей Беккереля. Если создать однородное магнитное поле, перпендикулярное направлению пучка, β-лучи искривятся и опишут круговые траектории в плоскости, нормальной к направлению магнитного поля. Радиусы описываемых окружностей изменяются в широких пределах. Беккерель показал, что более проникающие лучи — это те, которые отклоняются слабее и, следовательно, описывают окружности с большими радиусами кривизны. Принимая пучок лучей, отклоненный магнитным полем, на фотографическую пластинку, мы получаем на ней следы, которые образуют подлинное подобие спектра, в котором различные лучи проявляют свои действия раздельно.

Можно предположить, что β-лучи состоят из частиц (электронов), заряженных отрицательным электричеством и выброшенных радием с большой скоростью. Пусть тогда m есть масса одной частицы, e — ее заряд, v — начальная скорость, ρ — радиус кривизны траектории, H — интенсивность магнитного поля (предполагаемая перпендикулярной к направлению начальной скорости), μ — магнитная проницаемость среды. Легко установить соотношение

$$\mu H\rho = \frac{mv}{e}. \qquad (1)$$

β-Лучи отклоняются также в электрическом поле. Предположим, что мы осуществили прямолинейный пучок этих лучей. Если создать

однородное электрическое поле, перпендикулярное к первоначальному направлению пучка, то лучи отклонятся в сторону, обратную направлению поля и опишут параболические траектории. Такой эксперимент можно осуществить, если пропустить пучок лучей между двумя параллельными металлическими пластинками, между которыми создана некоторая разность потенциалов. При тех средствах, которые имелись в нашем распоряжении, отклонение получилось слабым, и приходилось работать в вакууме.

Действительно, воздух под влиянием лучей становится проводящим; если же работать в воздухе, то изоляция будет несовершенной, и трудно поддерживать между пластинками постоянную и значительную разность потенциалов. Наиболее проникающие β-лучи в то же самое время наименее отклоняемые.

Действие электрического поля согласуется с высказанной выше баллистической гипотезой. Примем эту гипотезу и предположим, что однородное электрическое поле интенсивности h и шириной L действует на заряженную частицу, начальная скорость которой перпендикулярна направлению поля. Отклонение y в конце траектории при ее выходе из поля определяется формулой (2) в предположении, что отклонение незначительно

$$\frac{hL^2}{2y} = \frac{mv^2}{e}. \tag{2}$$

Из уравнений (1) и (2) можно определить, с одной стороны, скорость v частицы и с другой — отношение $\frac{e}{m}$ электрического заряда к соответствующей массе.

Опыты Беккереля показали, что для наиболее интенсивных β-лучей отношение $\frac{e}{m}$ близко к 10^7 электромагнитных единиц и что v имеет значение $1.6 \cdot 10^{10}$ см/сек. Эти числа того же порядка, что и в случае катодных лучей.

Кауфман проделал точные опыты по тому же вопросу. Этот физик подверг одновременному действию магнитного и электрического поля очень тонкий пучок лучей радия, причем оба поля были однородны и имели одно и то же направление, перпендикулярное начальному направлению пучка. Этот пучок улавливался на фотографическую пластинку, поставленную нормально к его первоначальному направлению. При отсутствии обоих полей след на пластинке имел вид маленького круглого пятна, которое мы уподобим точке. Когда действует одно только магнитное поле, различные β-лучи, неодинаково отклоняемые, но остающиеся в плоскости, нормальной к полю, оставляют на пластинке прямолинейный след. Когда же действовало одно только электрическое поле, различные β-лучи также отклонялись неодинаково в плоскости, проходящей через поле, и производили на пластинке прямолинейный след,

перпендикулярный предыдущему. Когда оба поля действовали одновременно, след на пластинке имел вид кривой.

Каждая точка этой кривой соответствует определенному роду β-лучей. Если на фотографической пластинке за оси координат взять те́ прямые, которые получались, когда каждое из полей действовало отдельно, координаты каждой точки кривой представляют собой электрическое и магнитное отклонения, относящиеся к одному и тому же роду лучей.

Приведем числа, полученные для v и $\frac{e}{m}$ Кауфманом, относящиеся главным образом к наиболее проникающим лучам радия. Для сравнения я привожу также числа, полученные Симоном для катодных лучей:

$\frac{e}{m}$ (в электромагнитных единицах)	v, см/сек.	
$1.865 \cdot 10^7$	$0.7 \cdot 10^{10}$	Для катодных лучей (Симон).
$1.31 \cdot 10^7$	$2.36 \cdot 10^{10}$	Для лучей радия (Кауфман).
$1.17 \cdot 10^7$	$2.48 \cdot 10^{10}$	
$0.97 \cdot 10^7$	$2.59 \cdot 10^{10}$	
$0.77 \cdot 10^7$	$2.72 \cdot 10^{10}$	
$0.63 \cdot 10^7$	$2.83 \cdot 10^{10}$	

Из этих данных видно, что некоторые β-лучи имеют скорость, близкую к скорости света. Понятно, что частицы, обладающие такой скоростью, если они очень малы, могут обладать очень сильной способностью проникать сквозь материю.

Отношение $\frac{e}{m}$ имеет, по-видимому, одно и то же значение для менее проникающих лучей радия и для катодных лучей. Однако это отношение уменьшается по мере возрастания скорости лучей. Дж. Дж. Томсон и Таунсенд полагают, что движующиеся заряженные электроны обладают зарядом, одинаковым для всех них и равным заряду, переносимому атомом водорода в электролизе раствора. Если это так, то необходимо принять, что масса частицы увеличивается вместе с ее скоростью, когда эта скорость приближается к скорости света.

В случае электролиза отношение $\frac{e}{m}$ равно 9650, тогда как для катодных лучей и для слабопроникающих β-лучей оно равно $1.865 \cdot 10^7$. Если принять, что в обоих случаях заряд e один и тот же, то отсюда следует, что масса электрона приблизительно в 2000 раз меньше массы атома водорода.

Теоретические соображения приводят к выводу, что инерция частицы всецело обусловлена ее зарядом, находящимся в движении; скорость движения электрического заряда не может быть изменена без затраты энергии. Другими словами, масса заряженной частицы, по крайней мере частично, есть кажущаяся, или электромагнитная, масса.

Абрагам дал формулу, позволяющую вычислить электромагнитную массу заряженной частицы в зависимости от ее скорости. Согласно этой формуле, масса, обязанная электромагнитным взаимодействиям, постоянна при малых скоростях, но эта масса увеличивается вместе со скоростью и стремится к бесконечности для скоростей, приближающихся к скорости света. Опыты Кауфмана согласуются с этой теорией, кроме того, они заставляют признать, что масса электрона имеет полностью электромагнитную природу. Эти результаты имеют большое теоретическое значение; они позволяют предвидеть возможность свести основания механики к динамике малых материальных заряженных частиц, находящихся в состоянии движения.

α-Лучи. α-Лучи радия значительно менее проникающие; пластинка алюминия толщиной в несколько сотых миллиметра поглощает их почти полностью. Они поглощаются также воздухом и не могут проникнуть в воздух при атмосферном давлении на расстояние больше 10 см. α-Лучи образуют наиболее существенную часть излучения радия, если условиться измерять излучение по производимой им ионизации воздуха. α-Лучи очень мало отклоняются даже очень сильными электрическим и магнитным полями, их даже сначала считали лучами, не отклоняемыми этими полями. Однако независимо от действия магнитного поля законы поглощения α-лучей стопой экранов позволили выделить их в особую группу и четко отличить их от лучей Рентгена.

В самом деле, проходя через последовательно расположенные экраны, α-лучи становятся все менее и менее проникающими, тогда как при тех же условиях проникающая способность лучей Рентгена увеличивается. Создается впечатление, что можно α-луч уподобить частице, энергия которой уменьшается при прохождении каждого экрана. Всякий данный экран поглощает α-лучи много сильнее тогда, когда он находится далеко от радия, чем тогда, когда он находится совсем рядом с радием.

Стрэт предположил, что α-лучи аналогичны *каналовым лучам*, возникающим в пустотных трубках. Резерфорду удалось показать действие магнитного поля на α-лучи, испускаемые радием, и осуществить первое измерение их отклонения. Беккерель подтвердил результаты, полученные Резерфордом, и произвел новое измерение этого явления. Де Кудр измерил электрическое и магнитное отклонение α-лучей в вакууме.

Из этих исследований следует, что α-лучи подобны снарядам, обладающим большой скоростью и заряженным положительным электричеством. Их отклонение в магнитном и электрическом полях происходит в обратную сторону по сравнению с тем, что имеет место в случае катодных лучей.

α-Лучи образуют, по-видимому, однородную группу: они все одинаково отклоняются магнитным полем и не дают поэтому растянутого спектра, как β-лучи. Формулы (1) и (2) применимы и здесь. На основании измерений де Кудра, проведенных в вакууме, найдено

$$V = 1.65 \cdot 10^9, \quad \frac{e}{m} = 6400.$$

Мы видим, что скорость движущихся частиц в 20 раз меньше скорости света. Если предположить, что заряд частицы такой же, как заряд атома водорода при электролизе, то окажется, что масса частицы имеет величину того же порядка, что и масса атома водорода (в случае водорода при электролизе отношение $\frac{e}{m} = 9650$). Отсюда заключают, что эти частицы много больше электрона, а скорость их меньше, чем скорость последнего; их проникающая способность также меньше.

Согласно опытам Беккереля, кривизна траектории α-лучей, распространяющихся в однородном магнитном поле, непостоянна, если это распространение происходит в воздухе при атмосферном давлении. Сначала эта кривизна одинакова с той, которая получается в вакууме, но по мере удаления от источника она делается все меньше и меньше. Можно объяснить это явление, если предположить, что к летящим частицам, составляющим эти лучи, во время их пути в воздухе соединяются новые частицы. Эта гипотеза объясняет увеличение поглощающей способности экрана для α-лучей по мере удаления экрана от излучающего источника.

α-Лучи — это как раз те лучи, которые играют активную роль в очень красивом опыте, осуществленном в *спинтарископе* Крукса. В этом приборе очень небольшое количество соли радия (доли миллиграмма) находится на тонкой металлической проволоке на небольшом расстоянии (0.5 мм) от фосфоресцирующего экрана с сернистым цинком. Наблюдая в темноте с помощью лупы ту сторону экрана, которая обращена к радию, можно видеть светящиеся точки, рассеянные по экрану и напоминающие звездное небо; эти светящиеся точки непрерывно появляются и исчезают. Согласно баллистической теории, можно представить, что каждая такая светящаяся точка, появляющаяся и вновь исчезающая, есть результат удара одной из налетающих частиц. Впервые мы имеем здесь явление, позволяющее увидеть индивидуальное действие одного атома.

γ-Лучи. γ-Лучи радия совершенно подобны лучам Рентгена. Они, по-видимому, составляют только небольшую долю полного излучения. Существуют γ-лучи, обладающие чрезвычайно высокой проникающей способностью; они очень слабо рассеиваются при прохождении через большинство тел.

Рассеяние лучей радия. Пусть пучок лучей Беккереля, испускаемый радием, ограничен щелями, вырезанными в свинцовых экранах. Если пучок встречает на своем пути какой-нибудь тонкий экран, то α-лучи поглощаются, β-лучи рассеиваются во все стороны, а γ-лучи частично проходят сквозь экран, оставаясь хорошо ограниченным пучком с резкими краями; γ-лучи могут также пройти через толстую стеклянную призму, сохраняя прямолинейность и резкие границы. Можно спросить

себя, во всех ли случаях β-лучи полностью рассеиваются, проходя через твердый экран? Опыты Беккереля показали, что пучок β-лучей может распространяться в парафине, хорошо сохраняя свою форму. Беккерель пользовался действием β-лучей на фотографические пластинки, чтобы изучить на них следы траектории β-лучей, рассеянных магнитным полем. На снимках видно, что наиболее сильнопроникающие лучи проходят в парафине без заметного рассеяния расстояние 7 или 8 мм, тогда как лучи, менее проникающие, полностью рассеиваются после пробега 2 мм. Магнитное поле отклоняют β-лучи в парафине так же, как в воздухе.

Проводимость диэлектрических жидкостей под действием лучей радия. Диэлектрические жидкости становятся слегка проводящими под действием лучей радия. Это явление можно обнаружить на петролейном эфире, на вазелиновом масле, бензине, амилене, сероуглероде и на жидком воздухе.

Излучение других радиоактивных тел. Полоний испускает только слабопроникающие лучи, которые, по-видимому, тождественны α-лучам радия. Они имеют почти такую же проникающую способность и подобным же образом отклоняются магнитным полем; наконец, с помощью α-лучей полония можно провести опыт со спинтарископом. Полоний представляет собой источник α-лучей, в котором отсутствуют лучи другого рода, что очень ценно для некоторых исследований. Однако этот источник иссякает и по прошествии нескольких лет полоний, отделенный от содержащего его минерала, теряет свою активность.

Торий, *уран*, *актиний*, по-видимому, испускают α-лучи и β-; можно было установить отклоняемость β-лучей.

Электрический заряд лучей радия. Согласно баллистической теории, α-лучи должны переносить положительные электрические заряды, а β-лучи — отрицательные. Мы, г-жа Кюри и я, показали, в согласии с этой теорией, что β-лучи радия заряжают отрицательным электричеством те тела, которые их поглощают. Чтобы показать это, мы использовали свинцовую пластинку, соединенную с электрометром. Свинцовая пластинка покрыта со всех сторон слоем парафина, который в свою очередь покрыт тонким слоем алюминия, соединенного с землей. Радий, находящийся снаружи в маленькой ванночке, посылает свои лучи на защищенную таким способом свинцовую пластинку. α-Лучи задерживаются внешней алюминиевой оболочкой; часть β-лучей проходит через алюминий и парафин и оказывается поглощенной свинцом, заряжающимся при этом отрицательно. Парафин необходим для получения достаточной изоляции свинцовой пластинки, которая не могла бы удерживать свой заряд, если бы она была окружена воздухом, делающимся проводящим под действием лучей Беккереля.

Мы показали также, что соль радия заряжается положительно, если она окружена изолирующим слоем, пропускающим β-лучи и задерживающим α-лучи.

Запаянная стеклянная ампулка, содержащая соль радия, самопроизвольно заряжается электричеством подобно лейденской банке. Если по истечении достаточного времени провести резцом для стекла черту на ампулке, то появляется искра, которая пронизывает стекло в той точке, в которой стенка под действием резца становилась более тонкой; одновременно экспериментатор ощущает легкий укол в пальцах, вызванный действием разряда.

Фосфоресценция тел под действием лучей Беккереля. Свет, испускаемый солями радия. Окрашивание тел под действием лучей. Излучение радия вызывает фосфоресценцию большого числа тел: солей щелочных и щелочноземельных металлов, сернокислых уранила и калия, органических веществ, хлопка, бумаги, сернокислого цинхонина, кожи, стекла, кварца и т. д. Наиболее чувствительные тела — это платиносинеродистый барий, виллемит (силикат цинка), сернистый цинк из копей Сидо, алмаз. Для проникающих β-лучей виллемит и платиносинеродистый барий — наиболее чувствительные вещества, тогда как для α-лучей выгоднее применять фосфоресцирующий сернистый цинк.

При продолжительном действии лучей радия фосфоресцирующие вещества изменяются; они делаются менее возбудимыми, слабее светятся под действием лучей. В то же время эти тела меняют свой оттенок и окраску. Стекло окрашивается в фиолетовый, черный или коричневый цвет, соли щелочных металлов — в желтый, зеленый или синий; прозрачный кварц переходит в дымчатый кварц; бесцветный топаз становится желто-оранжевым и т. д. Стекло, окрашенное радием, *термолюминесцирует*; будучи нагрето до 500°, оно начинает светиться; и при этом оно обесцвечивается, возвращаясь к первоначальному состоянию; тогда оно способно заново окрашиваться под действием лучей радия.

Соли радия самопроизвольно светятся. Можно принять, что они сами фосфоресцируют под действием лучей Беккереля, которые они сами же испускают. Безводные хлорид и бромид радия — это те соли, которые дают наиболее интенсивное свечение. Можно получить настолько сильное свечение, что оно будет видимо при дневном свете.

Свет, излучаемый солями радия, напоминает по своему оттенку цвет светлячка (lampyre). Свечение солей радия уменьшается со временем, но не исчезает окончательно; при этом соль, сначала не окрашенная, приобретает серую, желтую или фиолетовую окраску.

Физиологические действия лучей радия. Лучи радия производят различные физиологические действия. Соль радия, помещенная в непрозрачную картонную или металлическую коробку, действует на глаз и вызывает ощущение света. Чтобы удостовериться в этом, достаточно поместить коробку, содержащую радий, перед закрытым глазом или около виска. В этих опытах среды глаза становятся светящимися вследствие фосфоресценции, вызванной лучами радия; воспринимаемый нами свет возникает в самом глазу.

Лучи радия действуют на кожный покров. Если держать несколько минут на коже ампулку, содержащую радий, то не испытывается никакого особого ощущения; но спустя 15 или 20 дней на коже появляется покраснение, затем струпья в той области, к которой была приложена ампулка. Если действие лучей было достаточно продолжительным, то образуется ранка, которая может потребовать нескольких месяцев лечения. Действие лучей радия на кожу аналогично действию, производимому лучами Рентгена. В настоящее время пытаются использовать эти действия при лечении волчанки и рака.

Лучи радия действуют также на нервные центры и могут вызвать паралич и смерть (Даниш). Они, по-видимому, также действуют особенно сильно на живые ткани в процессе их развития (Бон).

Использование радия при изучении атмосферного электричества. Лучи радия были использованы при изучении атмосферного электричества (Паульсен, Витковский, Муро). Небольшое количество соли радия, помещенные на конце металлического стержня, представляют собой хороший контакт [зонд] при определении потенциала. С помощью такого простого устройства при измерении потенциала в произвольной точке атмосферы избавляются от необходимости применения пламени или приборов с водяными каплями.

III. Теплота, выделяемая солями радия

Соли радия непрерывно выделяют тепло. Это выделение настолько интенсивно, что его можно продемонстрировать довольно грубым опытом с помощью двух обыкновенных ртутных термометров. Для этого используются два одинаковых сосуда с пустотной термоизоляцией. В одном из них помещена стеклянная ампулка, содержащая 0.7 г чистого бромистого радия, в другом находится стеклянная ампулка, содержащая какое-нибудь неактивное вещество, например хлористый барий.

Температура каждого сосуда определяется термометром, резервуар которого находится в непосредственной близости к ампулке. Отверстие изолятора закрыто ватой. При этих условиях термометр, находящийся в сосуде с радием, постоянно показывает температуру на 3° выше, чем другой термометр.

Можно определить количество тепла, выделяемого радием, пользуясь ледяным калориметром Бунзена. Помещая в калориметр стеклянную ампулку, содержащую соль радия, убеждаются в существовании непрерывного поступления тепла, которое прекращается только по удалении радия. Измерение, проведенное с давно приготовленной солью радия, показывает, что каждый грамм радия за один час выделяет 80 калорий. Таким образом, в течение каждого часа радий выделяет такое количество тепла, которое достаточно для расплавления льда такого же веса, что и сам радий. Между тем используемая при этом соль радия, по-видимому,

не изменяет своего состояния; нельзя указать ни одной обыкновенной химической реакции, которая могла бы объяснить такое непрерывное выделение тепла.

Можно также констатировать, что только что приготовленная соль радия выделяет сравнительно небольшое количество тепла. Тепло, выделяемое за некоторый определенный промежуток времени, затем непрерывно увеличивается и стремится к определенному значению, которое не может быть полностью достигнуто даже по истечении месяца.

Если растворить в воде соль радия и поместить раствор в запаянную трубку, то выделяемое раствором количество тепла сначала невелико; оно затем увеличивается и принимает постоянное значение спустя месяц. Когда такое предельное состояние достигнуто, то находящаяся в запаянной трубке соль радия выделяет одинаковое количество тепла как в твердом состоянии, так и в состоянии раствора.

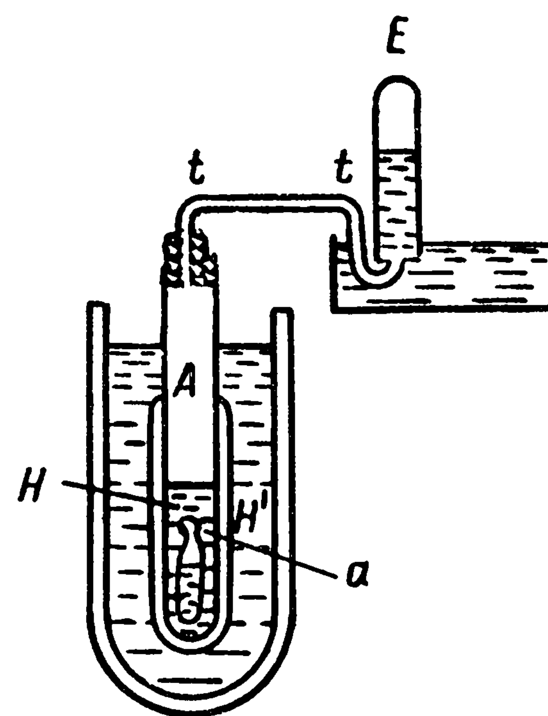


Рис. 1.

Можно также оценить количество тепла, выделяемое радием при различных температурах, используя его для кипения какого-либо сжиженного газа и измеряя объем полученного при этом газа. Такой эксперимент возможен с хлористым метилом (—21°).

Подобный опыт был осуществлен также профессором Дьюаром и мной с жидким кислородом (—180°) и жидким водородом (—252°). Это последнее вещество особенно удобно для проведения такого опыта. Пробирка *A* (рис. 1), закрытая снизу и помещенная в сосуд Дьюара, содержала немного жидкого водорода *H*; соединительная трубка *tt* позволяет собирать газ в градуированной пробирке, наполненной водой. Сама пробирка *A* и ее изолятор погружены в ванну с жидким водородом *H'*. При этих условиях внутри пробирки *A* не происходит никакого выделения газа. Если поместить ампулку *a*, содержащую 0.7 г бромистого радия, в водород пробирки *A*, то происходит непрерывное выделение газообразного водорода; за минуту его накапливалось 73 см^3. (Бромистый радий был приготовлен за 10 дней до опыта).

IV. О наведенной радиоактивности и радиоактивных эманациях

Наведенная радиоактивность. Радий, торий и актиний обладают свойством действовать на внешние тела не только посредством испускаемых ими лучей Беккереля. Они мало-помалу сообщают свои радиоактивные свойства находящимся вблизи их телам, а эти со своей стороны испускают лучи Беккереля. Таким образом активность передается газам,

жидкостям и твердым телам; это есть явление *наведенной радиоактивности.*

Наведенная радиоактивность распространяется в газах постепенно путем своего рода проводимости; она совершенно не обусловлена действием прямого излучения тел, ее вызывающих.

Если удалять активируемые тела от радиоактивных тел, то наведенная радиоактивность на этих телах некоторое время остается неизменной, однако, мало-помалу она уменьшается и в конце концов совершенно угасает.

Эманация. Чтобы объяснить эти явления, Резерфрод предположил, что радий или торий непрерывно выделяют радиоактивный неустойчивый материальный газ, который он назвал *эманацией.* Эманация распространяется в газе, окружающем радиоактивные тела; она постепенно разрушается, испуская лучи Беккереля и рождая другие неустойчивые радиоактивные материальные тела, которые уже нелетучи; эти новые вещества оседают на поверхности твердых тел и делают их радиоактивными. Не уточняя сколько-нибудь этой гипотезы, можно принять название эманация для обозначения *радиоактивной энергии* в той ее форме, в которой она проявляется при распространении в газе, окружающем радиоактивные тела; можно, кроме того, предположить, что эта энергия исчезает и порождает *энергию наведенной радиоактивности твердых тел.*

Радиоактивность, наведенная радием и его эманация. Если поместить твердую соль радия в закрытый сосуд, содержащий воздух, то внутренние стенки этого сосуда и все твердые тела, помещенные в него, становятся радиоактивными. Можно, например, ввести в сосуд пластинку какого-либо твердого тела, оставить ее там на некоторое время, затем извлечь и изучать ее активность. Обнаруживается прежде всего, что активность пластинки увеличивается вместе с продолжительностью ее пребывания в сосуде и достигает некоторого предельного значения, когда это время ее пребывания там достаточно продолжительно. Если активированную пластинку удалить из сосуда, она теряет свою активность по экспоненциальному закону, причем излучение падает до половины своей величины за время порядка получаса. В общем все твердые тела при одинаковых условиях активируются и дезактивируются одинаково.

Эти явления становятся много более интенсивны (приблизительно в 20 раз), если вместо того, чтобы помещать в сосуд твердые соли радия, поместить в него раствор той же соли, находящийся в открытой чашке.

Природа и давление газа, находящегося в сосуде, не оказывают никакого действия на наблюдаемые явления.

Активность, наведенная в сосуде, пропорциональна количеству содержащегося в нем радия. Если сосуд, содержащий радий, соединен трубкой со вторым сосудом, то твердые тела, находящиеся в последнем, также активируются по истечении достаточного времени. Передача активирую-

щего свойства из одного сосуда в другой может быть даже осуществлена при помощи капиллярной трубки.

Если газ, активированный в результате пребывания в замкнутом сосуде, содержащем радий, перевести в другой сосуд, он сохраняет в течение достаточно продолжительного времени способность делать радиоактивными твердые тела, находящиеся с ним в контакте. Газ, освобожденный от действия радия, теряет, однако, мало-помалу свою активирующую способность, которая, как функция времени, уменьшается по экспоненциальному закону; она падает до половины своей начальной величины в течение каждых 4 дней.

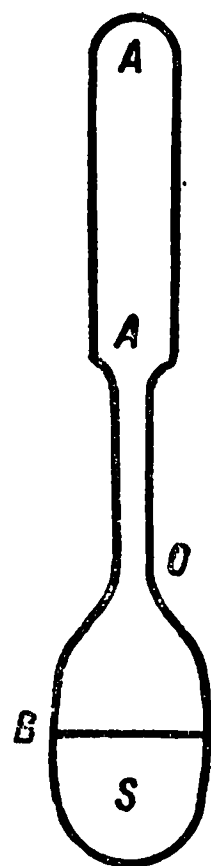


Рис. 2.

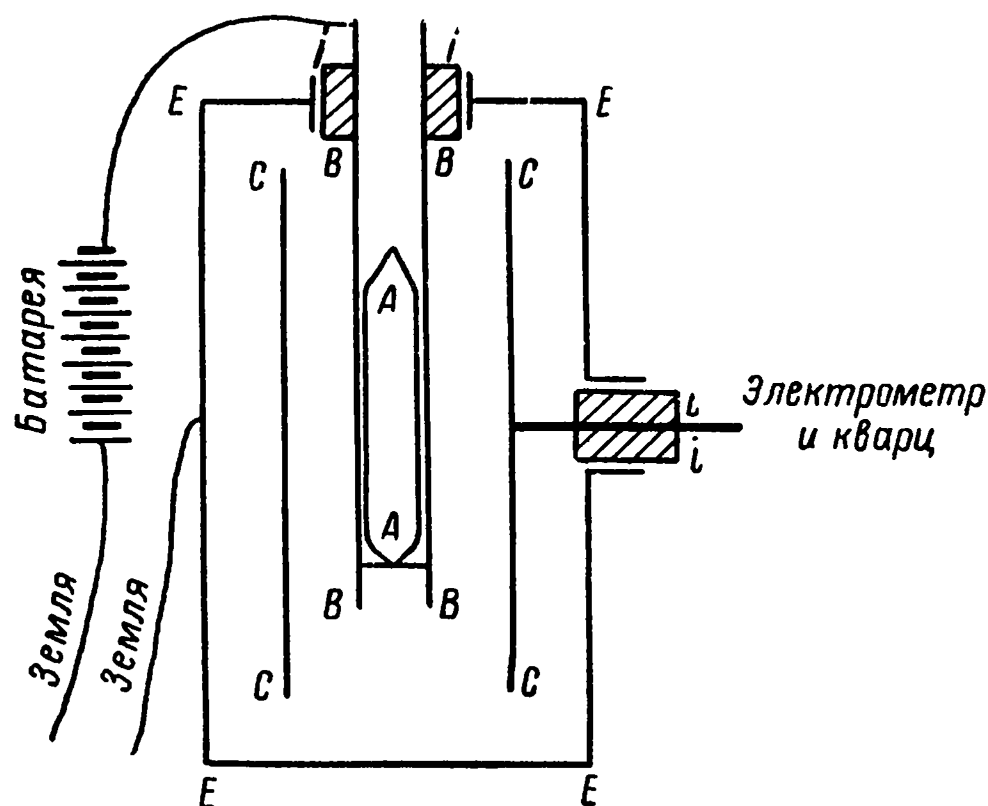


Рис. 3.

Чтобы объяснить эти явления, можно предположить, что радий постоянно и непрерывно испускает радиоактивную эманацию; эта эманация распространяется в воздухе сосуда и действует на твердые тела, активируя их. Если воздух перемещен в другой сосуд, то вместе с ним переходит и эманация; последняя затем самопроизвольно распадается с такой скоростью, что количество эманации, находящейся еще в газе, уменьшается вдвое в течение каждых 4 дней.

В сосуде, содержащем радий, устанавливается состояние равновесия, когда количество эманации в сосуде таково, что потеря эманации вследствие самопроизвольного ее распада точно компенсируется непрерывным поступлением эманации из радия.

Можно поставить следующий опыт. Стеклянный сосуд (рис. 2), наполненный воздухом, сообщается узкой трубкой O с ампулкой B, содержащей раствор радия S. По истечении некоторого времени эманация распространится в трубку A, и внутренние стенки ее активируются. Отделяют

трубку A от радия, запаивая ее в части O на горелке. После этого можно исследовать внешнее излучение трубки A, перенося ее во внутренний цилиндр цилиндрического конденсатора (рис. 3). Этот внутренний цилиндр $BBBB$ сделан из алюминия; его держат при потенциале 500 в. Внешний цилиндр $CCCC$ конденсатора медный; он соединен с электрометром и пьезоэлектрическим кварцем. При помощи этого последнего измеряют ток между обкладками конденсатора. Этот ток вызван лучами Беккереля, испускаемыми трубкой AA, проходящими через алюминиевый цилиндр $BBBB$ и делающими воздух между двумя цилиндрами проводящим. Аппарат окружен защитной металлической оболочкой $EEEE$, соединенной с землей.

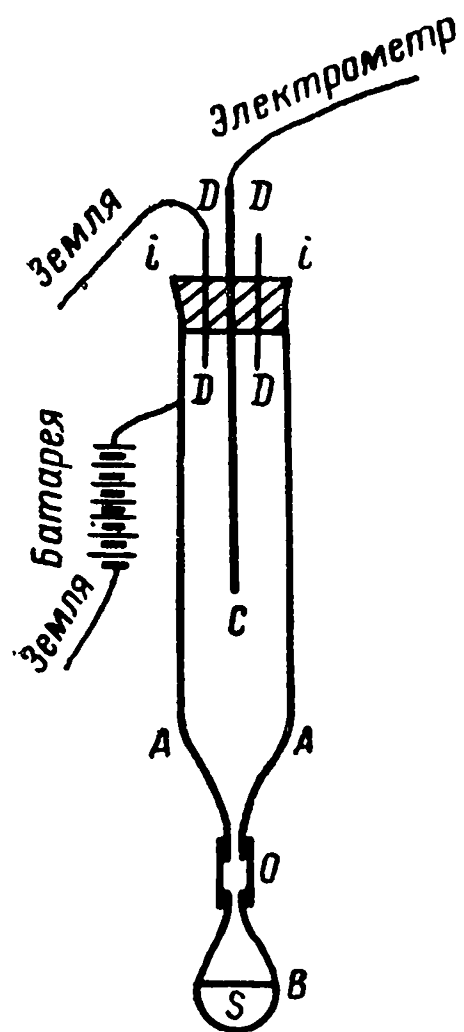


Рис. 4.

Установлено, что излучение трубки A уменьшается со временем по строго экспоненциальному закону вида

$$I = I_0 e^{-at},$$

где I_0 — начальное значение интенсивности излучения, I — интенсивность в момент t, a — постоянный коэффициент ($a=2.01 \cdot 10^{-6}$, если за единицу времени взять секунду). Интенсивность падает до половины своей величины приблизительно за 4 дня.

В другом опыте можно было активировать трубку AA, как указывалось раньше, а затем откачать ее, удалив из нее воздух, содержащий эманацию, находящуюся в трубке. При этих условиях уменьшение радиоактивности в трубке AA происходит много быстрее; излучение ослабевает в два раза за время порядка получаса. Этот закон дезактивации таков же, как закон, по которому активированные тела теряют свою активность, когда они находятся на открытом воздухе. Тот же результат получается, если после откачки трубки AA впустить в нее неактивный воздух.

Мы должны заключить, что в первом опыте активность трубки AA поддерживается воздухом, заряженным эманацией, находящейся в этой трубке, и что закон спадания излучения в этом опыте достаточно хорошо передается законом самопроизвольного исчезновения эманации.

Если в трубке A, содержавшей воздух, заряженный эманацией, создается пустота и если измерить излучение этой трубки непосредственно перед и после удаления из нее воздуха, то оказывается, что это излучение не изменяется в момент удаления активного воздуха. Таким образом, излучение Беккереля воздухом, заряженным эманацией, не производит в этом опыте никакого действия. Вероятно, такое излучение существует, но оно состоит из очень слабопроникающих лучей, не способных пройти сквозь стеклянные стенки.

В связи с этим можно поставить следующий опыт: один из концов металлической трубки AA (рис. 4) при помощи каучуковой трубки сообщается в точке O с резервуаром B, в котором находится раствор соли радия. Другой конец трубки AA закрыт изолирующей пробкой i; через последнюю проходит металлический стержень C, соединенный с электрометром. Трубка AA и стержень C образуют цилиндрический конденсатор; трубка AA поддерживается при потенциале 500 в. Металлическая трубка $DDDD$, соединенная с землей, служит защитной трубкой. Когда трубка AA достаточно активировалась, ее отделяют от радия и измеряют интенсивность тока, проходящего через конденсатор; затем быстро удаляют содержащийся в конденсаторе активный воздух, заменяя его неактивным, и сразу же производят новое измерение силы тока. Было найдено, что сила тока стала в 6 раз слабее. Во время второго измерения воздух в конденсаторе ионизируется одним только излучением активированных стенок, тогда как при первом измерении действовала также и эманация; таким образом, можно предположить, что последняя также испускает лучи. Это излучение должно быть очень малопроникающим, так как его внешнее действие не дает себя чувствовать.

Когда твердая пластинка, активированная эманацией, дезактивируется на открытом воздухе, закон дезактивации зависит от того времени, в течение которого пластинка оставалась в контакте с эманацией. Если действие эманации было продолжительно (например, более 24 час.), то закон дезактивации выражается разностью двух экспоненциальных функций. Интенсивность излучения I в этом случае может быть представлена как функция от времени уравнением

$$I = I_0 [K e^{-bt} - (K - 1) e^{-ct}],$$

где I_0 — интенсивность излучения в начальный момент времени, т. е. в момент освобождения пластинки от действия эманации; K, b и c — три постоянных коэффициента:

$$K = 4.2, \quad b = 0.000413, \quad c = 0.000538,$$

причем за единицу времени принята секунда.

Эти результаты представлены на рис. 5 (кривая *1*); логарифмы I отложены по оси ординат, время — по оси абсцисс. Через полтора часа после начала дезактивации вторая экспонента в выражении I становится пренебрежимой по сравнению с первой и кривая обращается в прямую. Начиная с этого момента, активность уменьшается вдвое за каждые 28 мин.

Если действие эманации менее продолжительно, то закон изменения излучения во время дезактивации значительно более сложен.

На рис. 5 представлены результаты опытов, относящихся к разной продолжительности активации; это время обозначено на соответствующей кривой. Мы видим, например, что при продолжительности активации,

равной 5 мин., интенсивность излучения при дезактивации начинается быстрым падением до некоторого минимума; затем излучение увеличивается, проходит через максимум и снова начинает уменьшаться; в конце концов закон дезактивации приближается к простому экспоненциальному закону, такому же, как и предельный закон после длительной активации. Эти сложные явления можно объяснить, если предположить, что радиоактивная энергия на активированной пластинке принимает последовательно три различных состояния; однако развитие относящихся сюда соображений заняло бы слишком много места, чтобы включать их в настоящую статью.

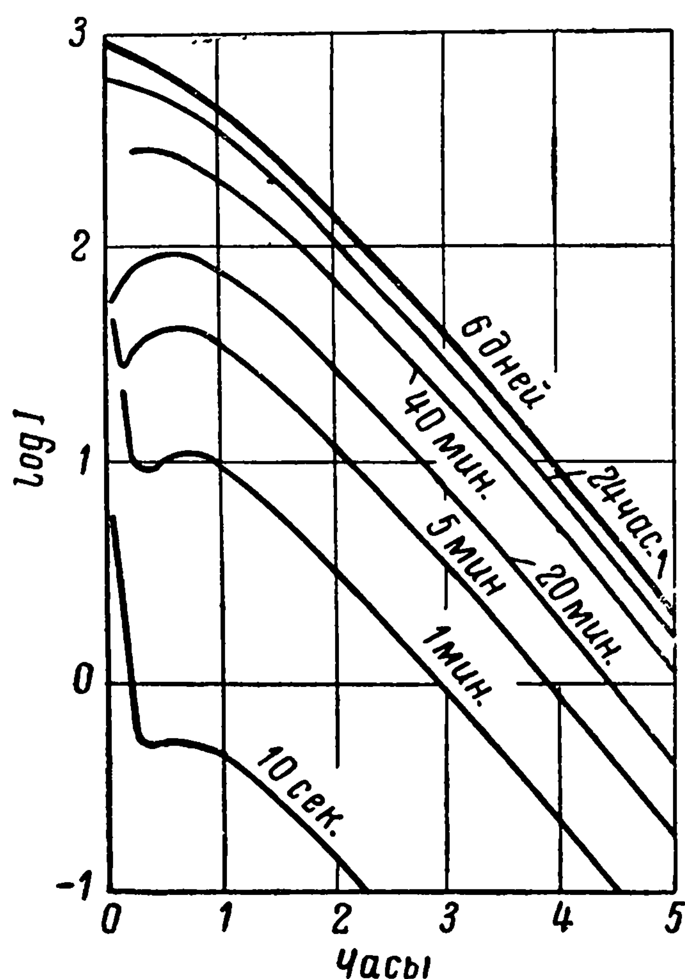


Рис. 5.

Эманация радия вызывает сильную фосфоресценцию большого числа тел. Стеклянный сосуд, содержащий заряженный эманацией воздух, становится светящимся; тюрингское стекло в этом отношении наиболее чувствительно. Фосфоресцирующий сернистый цинк особенно чувствителен к действию эманации радия и дает поэтому интенсивное свечение.

В активационном сосуде твердое тело активируется тем сильнее, чем больше над ними пространство, занимаемое свободным газом. Если параллельные между собой и находящиеся на малых расстояниях друг от друга пластинки поместить в активационный сосуд, то каждая сторона любой из пластинок активируется пропорционально расстоянию, отделяющему ее от стороны, к ней обращенной. Если стеклянные трубки разного диаметра заполнены эманацией и сообщаются между собой, то те из них, внутренний диаметр которых больше, обладают одновременно более радиоактивными стенками; эти трубки также сильнее светятся. Для объяснения этих фактов можно предположить, что воздух, заряженный эманацией, действует на стенки излучением, возникающим во всех точках массы газа, и что наведенная на стенке радиоактивность пропорциональна потоку активного излучения, получаемого этой стенкой.

Наведенная активность с медленным нарастанием. Твердое тело приобретает чрезвычайно слабую устойчивую наведенную радиоактивность, если оно остается в контакте с эманацией радия не менее одного месяца. Тело, извлеченное из активационного сосуда после продолжительного соприкосновения с эманацией, сначала быстро теряет свою активность по законам, которые мы уже формулировали. Но эта излучаемая активность полностью не исчезает; остается излучение в тысячу раз более слабое, чем начальное; это излучение нарастает чрезвычайно мед-

ленно и сохраняется несколько лет. (Оно проходит через минимум, затем медленно в течение нескольких месяцев увеличивается, все время оставаясь чрезвычайно слабым).

Окклюзия эманации радия твердыми телами. Все твердые тела, активированные соприкосновением с эманацией радия, приобретают способность испускать в свою очередь очень малые количества этой эманации. Они сохраняют эту способность только в течение 20 мин. с момента их извлечения из активационного сосуда. Однако некоторые твердые тела — целлулоид, каучук, парафин — обладают свойством *пропитываться эманацией* и излучать затем ее в изобилии в течение нескольких часов и даже нескольких дней.

Наведенная активность жидкостей. Жидкость, помещенная в активационный сосуд с радием, становится радиоактивной. Можно таким путем активировать воду, растворы солей, нефть и т. д. Эти жидкости растворяют некоторое количество эманации. Если активированную жидкость отделить от радия и поместить в запаянную ампулку, она медленно теряет свою активность, следуя закону распада эманации (убыль вдвое за 4 дня). Если жидкость налита в открытый в воздухе сосуд, она теряет очень быстро свою активность, и эманация переходит в окружающий воздух.

Изменение активности растворов солей радия и твердых солей радия. Раствор соли радия, находящийся в комнате в открытом сосуде, становится почти неактивным. Этот раствор испускает эманацию, распространяющуюся по помещению и вызывающую наведенную радиоактивность стен. Радиоактивность самого радия переходит таким образом во внешнее пространство. Если раствор помещен в запаянную трубку, то его активность постепенно возрастает и стремится к пределу, которого она достигает только по истечении одного месяца. Можно предположить, что производимая радием эманация накапливается в запаянной трубке до тех пор, пока скорость ее самопроизвольного разрушения не станет равной скорости поступления ее из радия.

Мы видели, что только что приготовленная твердая соль радия обладает активностью, которая возрастает со временем и становится приблизительно в 5 раз больше первоначальной. Можно предположить, что эманация, излучаемая радием, только с трудом выделяется из твердой соли, что она там скапливается и там же превращается в наведенную радиоактивность. Равновесие достигается, когда самопроизвольные потери становятся достаточными для компенсации ее образования.

Если твердую соль радия нагреть до температуры красного каления, то вся накопленная эманация выделяется; соль, остуженная до комнатной температуры, испускает тогда значительно меньше лучей Беккереля; однако мало-помалу излучение принимает свое первоначальное значение и это достигается в течение одного или двух месяцев. Соль, которая была нагрета до красного каления, теряет свои свойства испускать эманацию

во вне; но это свойство может быть ей возвращено растворением и высушиванием при менее высокой температуре.

Диффузия эманации радия. Мы, Данн и я, исследовали диффузию эманации радия. Большой стеклянный сосуд, наполненный активированным воздухом, сообщался с атмосферой через капиллярную трубку. Измеряют зависимость от времени излучения Беккереля, испускаемого стенками сосуда; отсюда выводят закон протекания эманации через капиллярную трубку. Было найдено, что скорость протекания эманации пропорциональна тому количеству эманации, которое находится в сосуде; эта скорость изменяется пропорционально сечению капиллярной трубки и обратно пропорционально ее длине. Это — те же законы, которые были найдены для газа, примешанного к воздуху при тех же условиях. Коэффициент диффузии эманации в воздухе при температуре 10° равен 0.100. Этот коэффициент, таким образом, того же порядка, что и коэффициент диффузии углекислого газа в воздухе, который при той же температуре равен 0.15.

Радиоактивность, наведенная торием, и эманация тория. Торий излучает эманацию и вызывает явления наведенной радиоактивности; эти свойства были предметом многочисленных исследований Резерфорда. Действие тория, впрочем, значительно менее интенсивно, чем действие радия.

Эманация тория самопроизвольно исчезает, следуя простому экспоненциальному закону, но это исчезновение идет значительно быстрее, чем в случае эманации радия; количество эманации тория уменьшается вдвое приблизительно за 1 мин. 10 сек., тогда как у радия количество эманации уменьшается вдвое за 4 дня. Такая значительная разница приводит нас к существенному изменению точки зрения на эти явления.

В замкнутом сосуде, размеры которого не особенно велики, эманация радия распространяется по всему объему сосуда почти равномерно. Но при тех же условиях эманация тория сосредоточивается вблизи тория, так как она самопроизвольно исчезает, не успевая продиффундировать в воздухе на заметное расстояние.

Можно измерить излучающую активность какого-либо вещества, помещая его на нижнюю пластинку конденсатора, образованного двумя параллельными горизонтальными пластинками и измеряя проводимость, которую это вещество сообщает воздуху, находящемуся между пластинками.

Если провести эти измерения с окисью тория, то можно убедиться, что проводимость между пластинками сильно падает, если пропускать между ними струю воздуха. В самом деле, окись тория испускает эманацию, которая накапливается над веществом, и своим излучением ионизует воздух между пластинками; поток воздуха уносит с собой эманацию по мере ее выделения, и поэтому причиной ионизации остается только излучение Беккереля, производимое непосредственно торием.

Можно повторить такой же опыт с солью радия; тогда наблюдение показывает, что поток воздуха оказывает только очень слабое действие. В случае урана и полония, которые не излучают эманацию, влияние потока воздуха равно нулю. Наоборот, в случае актиния поток воздуха уничтожает $\frac{4}{5}$ проводимости воздуха. Можно заключить, что у тория и в особенности у актиния излучение эманации существенно сильнее, чем излучение самого радиоактивного вещества.

Если хотят активировать эманацией тория до насыщения какое-либо твердое тело, необходимо заставить эманацию действовать в течение достаточно длительного времени, а для этого ее нужно постоянно обновлять у поверхности того тела, которое требуется активировать. Это можно получить, если непрерывный поток воздуха пропускать через раствор соли тория и затем этот поток воздуха, заряженный эманацией, направить на активируемое тело. Твердое тело, активированное эманацией тория, самопроизвольно дезактивируется по экспоненциальному закону; излучение падает до половины за каждые 11 час. Таким образом, в противоположность тому, что происходит с эманациями, активность, наведенная торием на твердые тела, исчезает значительно медленнее, чем активность, наведенная радием.

Радиоактивность, наведенная актинием, и эманация актиния. Актиний испускает эманацию, обладающую очень интенсивным излучением. Эта эманация самопроизвольно исчезает с исключительно большой скоростью; она уменьшается вдвое за время порядка 1 сек. В воздухе при атмосферном давлении эманация, испускаемая актинием, не может распространяться на расстояние больше 7 или 8 мм от активного вещества; таким образом, она активна только на твердых телах, находящихся близко у самого источника. Наоборот, в сосуде без воздуха процесс диффузии происходит быстро, и тело, помещенное на расстоянии 10 см от актиния, способно еще активироваться. Радиоактивность, наведенная актинием на твердые тела, исчезает, следуя экспоненциальному закону; она уменьшается вдвое, приблизительно за 36 мин.

Концентрация радиоактивности, наведенной на отрицательно заряженные тела. Резерфорд показал, что тело, подверженное действию эманации тория, активируется сильнее, если его держать при отрицательном электрическом потенциале, чем в том случае, когда оно находится при том же потенциале, что и окружающие тела; наоборот, оно активируется слабее, если его держать при положительном потенциале. То же самое происходит при активации радием и актинием. Природа этого любопытного явления мне кажется пока еще недостаточно хорошо разъясненной.

Конденсация эманации радия и тория. Резерфорд и Содди установили, что эманация радия и тория конденсируется при температуре жидкого воздуха. Поток воздуха, заряженный эманацией, теряет свои радио-

активные свойства при прохождении через змеевик, погруженный в жидкий воздух. Эманация остается конденсированной в змеевике; при нагревании она вновь возвращается в свое газообразное состояние. Эманация радия конденсируется при —150°, а эманация тория — в пределах температуры от —100 до —150°. Можно провести следующий опыт: два стеклянных сосуда, один большой, другой маленький сообщаются друг с другом; они наполнены газом, активированным радием. Маленький сосуд помещают в жидкий воздух. Большой резервуар тогда быстро становится неактивным, а вся активность сосредоточивается в малом сосуде. Если затем прервать сообщение между обоими сосудами и вынуть маленький сосуд из жидкого воздуха, то окажется, что большой сосуд не светится, в то время как маленький светится сильнее, чем в начале опыта. Этот опыт особенно эффектен, если внутренние стенки сосудов покрыты фосфоресцирующим сернистым цинком.

Если нагреть до красного каления платиновую проволоку, активированную торием или радием, то она теряет большую часть своей активности. Фанни Кук Гейтс показала, что эта радиоактивность передается ненагретым твердым телам, находящимся близ проволоки; она как бы перегоняется при достаточно высокой температуре, переходя через промежуточную форму газообразной эманации.

Наведенная радиоактивность твердых тел, таким образом, аналогична конденсированной эманации.

Активность, наведенная в результате пребывания тел, находящихся в растворенном состоянии в радиоактивном растворе. Торий X. *Уран* X. Некоторые тела приобретают временную активность, когда они находятся в общем растворе вместе с радиоактивными телами. Гизель и г-жа Кюри приготовили таким путем активный висмут, растворив соль висмута в растворе соли радия. Дебьерн также активировал соль бария в растворе соли актиния; соль бария, активированная таким способом, представляет собой некоторую аналогию с солями радия и фракционируется таким же способом; путем кристаллизации хлористого соединения активность концентрируется в той соли, которая осаждается.

Различными способами с помощью химических осаждений удается также разделить активность урана (Крукс, Содди, Резерфорд и Грир, Дебьерн, Беккерель). Вносят, например, хлористый барий в раствор азотнокислого уранила и осаждают барий в виде сульфата, прибавляя немного серной кислоты.

Осажденный сернокислый барий, отделенный и высушенный, радиоактивен; он увлекает с собой некоторую часть активности урана, так как соль урана, извлеченная из раствора, выпаренного досуха, обнаруживает меньшую активность, чем до того, как она была подвергнута этой операции. Но по прошествии нескольких месяцев сернокислый барий теряет свою радиоактивность, тогда как соль урана восстанавливает свои первоначальные свойства. Можно предположить, что соль бария активирова-

лась в соприкосновении с ураном или, что она увлекла с собой в какой-то особой форме часть активности последней (*уран* X Крукса).

Резерфорд и Содди показали, что если при осаждении азотнокислого тория аммиаком осажденная окись тория менее активна, чем обыкновенная окись тория, то жидкость, в которой она осаждается, радиоактивна, и, испаряя ее досуха, получают очень небольшой осадок, который, однако, в 2500 раз более активен, чем соединение тория (радиоактивное вещество, находящееся в указанном осадке, называют *торием* X). По прошествии нескольких недель этот осадок теряет свою активность, торий X исчезает, а осажденное соединение тория восстанавливает свою нормальную активность. Кроме того, до тех пор пока торий существует, он в изобилии испускает *эманацию тория*.

Резерфорд и Содди предполагают, что уран X и торий X представляют собой промежуточные продукты распада урана и тория. Торий, например, непрерывно создает торий X, а последний, распадаясь, испускает эманацию тория, которая в свою очередь обращается в наведенную активность.

Проводимость атмосферного воздуха. Эманация и наведенная радиоактивность на поверхности почвы. Эльстер и Гейтель, с одной стороны, и Вильсон — с другой, показали, что атмосферный воздух всегда слегка проводит электричество; этот воздух всегда немного ионизован. По-видимому, эта ионизация зависит от многих причин. Согласно работам Эльстера и Гейтеля, атмосферный воздух всегда содержит в очень малой доле эманацию, аналогичную той, которую испускают радиоактивные тела. Металлическая нить, натянутая в воздухе и поддерживаемая при высоком отрицательном потенциале, активируется под влиянием этой эманации. На вершинах гор атмосферный воздух содержит больше эманации, чем в долинах или на берегу моря. Воздух в подвалах и пещерах особенно сильно заряжен эманацией. Воздух, очень богатый эманацией, получается также всасыванием через трубку, погруженную в почву, содержащегося в ней воздуха. Воздух, извлекаемый из некоторых минеральных вод, содержит эманацию, тогда как воздух, содержащийся в морской или речной воде, почти лишен ее.

Вероятно, проводимость атмосферного воздуха отчасти обусловлена еще сильнопроникающей радиацией, пронизывающей мировое пространство, но происхождение которой нам неизвестно. Наконец, вероятно, что все тела слегка радиоактивны и что те из них, которые находятся на поверхности почвы, делают окружающий воздух проводником электричества.

Постоянные времени, характеризующие исчезновение эманаций и наведенной радиоактивности. Мы видели, что радиоактивные эманации и наведенная радиоактивность твердых тел самопроизвольно исчезают и что закон их исчезновения есть, в общем, простой экспоненциальный закон. Интенсивность излучения I, как функция от времени t, задается формулой вида

$$I = I_0 e^{-at},$$

где I_0 — начальная интенсивность излучения, a — постоянная. Экспоненциальный закон полностью определен, если нам известна *постоянная времени*, равная обратной величине постоянной a в предыдущей формуле. Можно было бы принять за постоянную времени то время, которое необходимо для того, чтобы интенсивность уменьшилась вдвое.

Весьма примечательно, что эти постоянные времени остаются неизменными при весьма различных обстоятельствах. Так, эманация радия уменьшается до половины в течение каждых 4 дней независимо от того, каковы были условия эксперимента и какова была температура в пределах от —180 до +450°; скорость исчезновения эманации остается одинаковой как в случае эманации в состоянии газа (при комнатной температуре), так и в конденсированном состоянии (при —180°). Эти свойства эманации радия дают нам, таким образом, *эталон времени*, *неизменный* и независимый от всяких соглашений об единицах.

Эти постоянные времени радиоактивности позволяют точно характеризовать природу различных видов радиоактивной энергии.

Приводим значения времени, необходимого для падения активности на половину своей величины:

Для эманации радия . . .	4 дня
» » тория . . .	1 мин. 10 сек.
» » актиния .	Несколько секунд
Для радиоактивности, наведенной радием	1 час (с начала дезактивации). 28 мин. (для промежутков времени, превосходящих 2 часа после начала дезактивации).
Для радиоактивности, наведенной торием	11 час.
Для радиоактивности, наведенной актинием . . .	36 мин.

Дж. Дж. Томсон и Адам недавно обнаружили, что эманация воды некоторых источников уменьшается до половины за каждые 4 дня и что эта эманация вызывает наведенную активность твердых тел, убывающую наполовину приблизительно за 40 мин. Отсюда мы вправе заключить, что эманация, содержащаяся в воде этих источников, обязана своим происхождением радию.

Обыкновенный торий, извлеченный из монацитовых песков, слабо радиоактивен. Торий, извлеченный из смоляной руды, сильно радиоактивен (торий с актинием Дебьерна). Радиоактивность в этих двух случаях не может быть обусловлена присутствием одного и того же радиоактивного вещества, так как постоянные времени эманации и наведенной радиоактивности различны.

Некоторые радиоактивные тела, такие, как актиний, никак не удается выделить в чистом виде, и есть основания предполагать, что изученные

сильно активные вещества в действительности содержат только следы таковых. Химические свойства этих тел не могут быть точно установлены, если эти тела находятся только в разреженном состоянии и примешаны к другим веществам. Происходит их увлечение при осаждении, и действие реактивов не будет таким же, какое получилось бы в случае чистых тел. Химические реакции не могут тогда больше служить характеристиками радиоактивных тел; таковые можно будет, наоборот, при всех обстоятельствах характеризовать постоянной времени эманации, излучаемой ими, и постоянной времени наведенной радиоактивности, которую они вызывают в твердых телах.

Природа эманации. Согласно Резерфорду, эманация всякого радиоактивного тела представляет собой материальный радиоактивный газ, выделяемый этим телом. Действительно, какова бы ни была точка зрения, эманация радия всегда ведет себя, как газ.

Когда два стеклянных сосуда, из которых один содержит эманацию, а другой нет, соединяют между собой, то эманацию диффундируют во второй сосуд, и можно убедиться, что при наступлении равновесия эманация в обоих сосудах распределяется пропорционально их объемам. Можно также поддерживать один из сосудов при 350°, а другой — при комнатной температуре и убедиться, что в этом случае эманация распределяется между обоими сосудами так, как это было бы у идеального газа, повинующегося законам Мариотта и Гей-Люссака.

Мы видели также, что эманация радия диффундирует в воздухе, согласно закону диффузии газа, с коэффициентом диффузии, сравнимом с таковым у углекислого газа. Наконец, эманация радия и тория конденсируется при низких температурах так же, как сжижающиеся газы.

Однако следует напомнить, что до сих пор не удалось наблюдать какого-либо давления эманации и не удалось взвешиванием определить присутствие какого-либо материального газа. Все наши сведения о свойствах эманации вытекают из измерения радиоактивности. Пока еще нельзя с полной достоверностью утверждать, что получен спектр, характерный для эманации.

Впрочем, эманация не может рассматриваться как обыкновенный материальный газ, так как она самопроизвольно исчезает из запаянной трубки, в которой содержится, и скорость этого исчезновения абсолютно не зависит от условий эксперимента, в частности от температуры.

Весьма любопытно, что сделанные при различных условиях попытки получить химические реакции с эманациями оказались бесплодными. Чтобы объяснить это обстоятельство, Резерфорд высказал предположение, что эманация представляет собой газ из семейства аргона.

Вот еще некоторые факты, трудные для объяснения: эманация радия конденсируется при —150°. При —153° же, согласно Резерфорду, можно пропускать непрерывный поток воздуха на сжиженную эманацию без всякого ее увлечения, однако количество конденсированной эманации

должно быть крайне незначительно, и если бы существовало малейшее давление ее пара при —153°, то эманация не замедлила бы испаряться в потоке воздуха. Кроме того, температура конденсации при охлаждении должна была бы быть функцией количества эманации, содержащейся в данном объеме воздуха, но это не было обнаружено. Мы, Дебьерн и я, нашли, что эманация с крайней легкостью проходит через узкие отверстия и самые тонкие щели в твердых телах, тогда как обыкновенные материальные газы при тех же условиях могут проходить через них только исключительно медленно.

Резерфорд предполагает, что радий самопроизвольно разрушается и что эманация является продуктом его распада.

Мы, Дебьерн и я, наблюдали, что твердая соль радия достаточно быстро активирует с помощью выделяемой ею эманации стенки наполненного воздухом содержащего ее сосуда. Наоборот, если создать в сосуде очень хороший вакуум, то активация происходит крайне медленно, однако она быстро вновь появляется, если впустить в сосуд газ. Между тем эманация распространяется значительно более быстро в газе при очень низком давлении, чем в том же газе при атмосферном давлении. Таким образом, приходится принять, что в пустоте эманация испытывает какое-то особое затруднение для своего высвобождения из радия.

Выделение газа солями радия. Образование гелия. Гизель заметил, что растворы бромистого радия постоянно выделяют газ. Этот газ состоит главным образом из водорода и кислорода, относительная пропорция которых такая же, как и для воды; они, таким образом, могут происходить от разложения воды раствора. Однако Рамзай и Содди сверх того еще установили в этом газе постоянное присутствие небольшого количества гелия, который они могли характеризовать по его спектру, получаемому с помощью трубки Гейслера. При этом линии гелия сопровождались тремя неизвестными линиями.

Твердая соль радия постоянно выделяет также газ, способный создавать некоторое давление в закрытой трубке. Этому же выделению газа можно приписать также два происшествия, которые произошли в моих опытах. Тонкая запаянная стеклянная ампулка, почти заполненная хорошо высушенным бромистым радием, взорвалась под действием слабого нагревания. Такой же взрыв произошел также с сухим хлористым радием, который я *в пустоте* подверг достаточно быстрому нагреванию на 300°; в этом случае были обнаружены мелкие кусочки твердой соли, наполненные окклюдированным газом, который, по-видимому, и вызвал взрыв.

В момент, когда растворяют в воде задолго до этого приготовленную твердую соль радия, замечается обильное выделение газа.

Самопроизвольное образование гелия в запаянной трубке, содержащей радий, есть, очевидно, новый факт исключительной важности. Рамзай и Содди сверх того собрали эманацию радия и заключили ее вместе с кисло-

родом под малым давлением в трубку Гейслера. Они получили новые спектральные линии, которые они приписали эманации, и, кроме того, констатировали, что спектр гелия, первоначально отсутствовавший, постепенно возникал в их трубке. Отсюда следует, что гелий мог быть одним из продуктов распада радия.

В подтверждение предыдущих результатов можно вспомнить некоторые замечания, которые были сделаны г-жой Кюри и мною в начале наших исследований. Мы были сильно удивлены одновременным присутствием радия и гелия в некоторых минералах урана. Мы брали 50 кг продажного хлористого бария, происходящего из минералов, не заключающих в себе урана, подвергли это хлористое соединение фракционной кристаллизации с целью убедиться, не содержит ли оно следы хлористого радия. После продолжительного фракционирования порция итоговой фракции, которая свелась к нескольким граммам, не обнаружила никакой радиоактивности. Таким образом, барий заключает в себе радий только тогда, когда он выделен из минералов урана. Но это были те же минералы, которые содержат гелий. Можно думать, что существует известная причинная зависимость в одновременном присутствии этих трех веществ.

Этот беглый обзор исследования радиоактивности достаточен, чтобы показать важность того научного сдвига, который был вызван изучением указанных явлений. Полученные результаты способны изменить наши идеи о неделимости атома, о сохранении материи и энергии, о природе массы тел и об энергии, распределенной в пространстве. На обсуждение, таким образом, ставятся наиболее важные проблемы науки. Помимо теоретического интереса, явления радиоактивности доставляют физикам, химикам, физиологам и врачам новые средства исследования.

Литература

Излучение урана:

H. Becquerel, C. r., **122**, 689, 762, 1086, 1896; **123**, 855, 1896; **124**, 438, 800, 1897.

M. Curie, C. r., **126**, 1101, 1898.

E. Rutherford, Phil. Mag., **47**, 109, 1899.

Радиоактивные минералы:

M. Curie, C. r., 126, 1101, 1898.

Излучение тория:

G. K. Schmidt, Wied. Ann., 65, 141, 1899.

M. Curie, C. r., **126**, 1101, 1898.

E. Rutherford, Phil. Mag., **47**, 109, 1899.

Owens, Phil. Mag., 48, 360, 1899.

Излучение полония:

P. Curie, M. Curie, C. r., **127**, 175, 1898.

M. Curie, Rev. génér. des sciences, 30 janvier 1899; Докт. дисс., июнь 1903, Париж.

H. Becquerel, C. r., **130**, 979, 1154, 1900; **129**, 1230, 1899.

W. Marckwald, Ber. Dtsch. chem. Ges., **35**, 2285, 1902.

H. Becquerel, C. r., **136**, 431, 977, 1903.

Радий:
P. Curie, M. Curie, G. Bemont, C. r., **127**, 1215, 1898.
Атомный вес радия:
M. Curie, C. r., **129**, 760, 1899; **131**, 382, 1900; **135**, 161, 1902; Докт. дисс., июнь 1903, Париж; Phys. Zs., **4**, 456, 1903.
Спектр радия:
E. Demarçey, C. r., **127**, 1218, 1898; **129**, 116, 1899; **131**, 258, 1900.
F. Giesel, Phys. Zs., **3**, 578, 1902.
C. Runge, J. Precht, Phys. Zs., **4**, 285, 1903.
Излучение радия:
P. Curie, M. Curie, C. r., **129**, 823, 1899; **130**, 73, 76, 1900; **130**, 647, 1900; **134**, 420, 1902.
H. Becquerel, C. r., **129**, 912, 996, 1205, 1899; **130**, 206, 372, 809, 979, 1154, 1900.
F. Giesel, Wied. Ann., **69**, 91, 834, 1899.
S. Meyer, V. Schweidler, Wien. Sitzber. Anz., **36**, 351, 1899.
W. Kaufmann, Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, 291, 1903; 90, 1903.
E. Rutherford, Phil. Mag., **5**, 177, 1903.
H. Becquerel, C. r., **136**, 199, 431, 977, 1903.
Th. Des Coudre, Phys. Zs., **4**, 483, 1903.
W. Crookes, Chem. News, **87**, 158, 1903.
Теплота, выделяемая радием:
P. Curie, A. Laborde, C. r., **136**, 673, 1903.
Актиний:
A. Debierne, C. r., **129**, 593, 1899; **130**, 906, 1900; **131**, 333, 1900; **136**, 446, 671, 1903.
Радиоактивный свинец:
F. Giesel, Ber. Dtsch. Chem. Ges., **34**, 3779, 1901.
K. A. Hofmann, E. Strauss, там же, **33**, 3126, 1900.
Радиоактивность всех тел:
R. J. Strutt, Phil. Trans., **A 196**, 507, 1901; Phil. Mag., **5**, 680, 1903.
J. C. McLennan, E. F. Burton, Phys. Rev., **6**, 343, 1903.
H. Lester Cooke, Phil. Mag., **6**, 403, 1903.
Наведенная радиоактивность и эманация радия:
P. Curie, M. Curie, C. r., **129**, 714, 1899.
P. Curie, A. Debierne, C. r., **132**, 548, 768, 1289, 1901; **133**, 276, 931, 1901.
P. Curie, C. r., **135**, 857, 1902; **136**, 223, 1903.
P. Curie, J. Danne, C. r., **136**, 364, 1314, 1903.
F. E. Dorn, Abh. Naturforsch. Ges. Halle, **23**, 1, 1901.
E. Rutherford, H. T. Brooks, Chem. News, 1902.
E. Rutherford, F. Soddy, J. Chem. Soc., Lond., **81**, 321; **82**, 271, 282, 293, 304, 1902.
E. Rutherford, Phys. Zs., **3**, 210, 1902; Phil. Mag., **4**, 370, 569, 1902; **5**, 445, 1903.
E. Rutherford, F. Soddy, Phil. Mag., **5**, 561, 1903.
Наведенная радиоактивность и эманация тория:
E. Rutherford, Phil. Mag., **49**, 1, 161, 1900; Phys. Zs., **2**, 491, 1901.
E. Rutherford, F. Soddy, J. Chem. Soc., Lond., **81**, 321, 837, 1902; Phil. Mag., **4**, 370, 569, 1902.
E. Rutherford, Phys. Zs., **3**, 235, 1902; Phil. Mag., **4**, 1, 1902; **5**, 177, 1903.
Радиоактивность и ионизация атмосферы, воды источников:
J. Elster, H. Geitel, Phys. Zs., **1**, 11, 1900; **2**, 590, 1901.

C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. (Lond.), A 68, 151, 1901.
E. Rutherford, F. Allen, Phil. Mag., 4, 704, 1902.
J. Elster, H. Geitel, Phys. Zs., 3, 574, 1902.
J. C. McLennan, Phil. Mag., 5, 419, 1903.
J. C. McLennan, E. F. Burton, Phys. Rev., 16, 184, 1903.
J. J. Thomson. Conduction of electricity through gases. Cambr., 1903.
J. Elster, H. Geitel, Arch. de sci. phys. et natur., Geneve, 17, 5, 1904.
Газ, выделяемый радием:
F. Giesel, Ber. Dtsch. chem. Ges., 36, 347, 1903.
W. Ramsay, F. Soddy, Phys. Zs., 4, 651, 1903.
Физиологические действия лучей Беккереля.
Действие на эпидерму:
Walkoll, Photogr. Rundschau, 1900.
H. Becquerel, P. Curie, C. r., 132, 1289, 1901.
Действие на глаз:
F. Giesel, Verh. Dtsch. phys. Ges., 1899.
F. Himstedt, W. Nagel, Ann. der Phys., 4, 587, 1901.
Физиологические действия:
E. Aschkinass, W. Caspari, Ann. der Phys., 6, 570, 1901.
J. Danysz, C. r., 136, 461, 1903.
G. Bohn, C. r., 136, 1012, 1903.
Лечение волчанки:
Danclos, Soc. de dermatologie, 1901.
Hallopau, Gadaud, там же, 1902.
Blandamour. Дисс., Мед. фак., Париж, 1902.



XXXVI

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗА, ОККЛЮДИРУЕМОГО И ВЫДЕЛЯЕМОГО БРОМИСТЫМ РАДИЕМ [1]

(СОВМЕСТНО С ДЖ. ДЬЮАРОМ [2])

Образчик чистого высушенного бромистого радия массы 0.4 г оставался 3 месяца в стеклянной ампулке, сообщающейся с маленькой трубкой Гейслера и ртутным манометром. В начале опыта было создано весьма сильное разрежение во всем приборе. В течение этих трех месяцев в приборе происходило самопроизвольное выделение газа, пропорциональное времени (по 1 см^3 газа при атмосферном давлении за каждый месяц). Спектроскопическое исследование с помощью трубки Гейслера обнаружило только присутствие водорода и паров ртути. Можно предположить, что при введении в прибор соли одновременно вводилось небольшое количество воды, которая постепенно разлагалась под действием радия (Гизель).

Тот же образчик бромистого радия был переправлен в Англию в лабораторию профессора Дьюара при Королевском институте с целью измерить выделение тепла при температуре кипения жидкого водорода.[1]

Там бромистый радий был перенесен в кварцевую ампулку с трубкой из того же материала. В ампулке создавалась пустота, затем кварцевая трубка нагревалась до красного каления, пока не наступало плавление бромистого радия; откачка продолжалась, и с помощью ртутного насоса собирали выделившийся во время нагревания окклюдированный газ. Прежде чем газ достигал насоса, всасываемый газ проходил через три маленьких U-образных стеклянных трубки, погруженных в жидкий воздух, которые задерживали большую часть эманации радия, а также менее летучие газы.

Газы, всасываемые ртутным насосом, были собраны в стеклянную пробирку над ртутью и исследованы Дьюаром. Эти газы занимали объем в 2.6 см^3 при атмосферном давлении; они увлекли с собой некоторую часть эманации радия и оказались радиоактивными и светящимися. *Собствен-*

---

[1] В ближайшее время мы представим Академии результаты этих исследований.

ный свет, излучаемый пробиркой, содержащей газы, после трех дней экспозиции кварцевым фотографическим спектроскопом дал прерывистый спектр, состоящий из трех линий, совпадающих с началом трех главных полос азота — 3800, 3580 и 3370.[2] За эти три дня стеклянная трубка приобрела темно-фиолетовый оттенок, и половина объема газа была абсорбирована.

При пропускании искры через газы, перешедшие в трубку Гейслера, в спектроскопе получали также полосы азота. При сжижении азота в жидком водороде в трубке Гейслера получался более высокий вакуум, и искра тогда указывала на присутствие одного только водорода и ничего другого.

Кварцевая трубка, содержащая плавленый бромистый радий и полностью освобожденная от окклюдированного газа, была запаяна на кислородном пламени во время его откачки и возвращена в Париж. Деландр любезно согласился исследовать ее спектроскопически (приблизительно 20 дней спустя после запайки трубки). Деландр просил нас доложить, что газ, содержащийся в трубке, свечение которого вызывалось катушкой Румкорфа с помощью двух маленьких колпачков из оловянной фольги, покрывающих снаружи оба конца трубки, дал *полный спектр гелия*; после трехчасовой экспозиции с кварцевым фотографическим спектроскопом никаких других линий, кроме линий этого газа, обнаружено не было[3] [[3]].

Собственный свет, самопроизвольно испускаемый трубкой с радием (без индукционной катушки), всегда давал непрерывный спектр без темных и светлых линий, выделяющихся на сплошном фоне в спектроскопе, который, правда, имел небольшую дисперсию.



[2] Эти результаты близки к результатам, полученным г-ном и г-жой Хаггинс (Huggins), которые показали, что спектр света, самопроизвольно испускаемого солями радия в воздухе, состоит из полос азота.

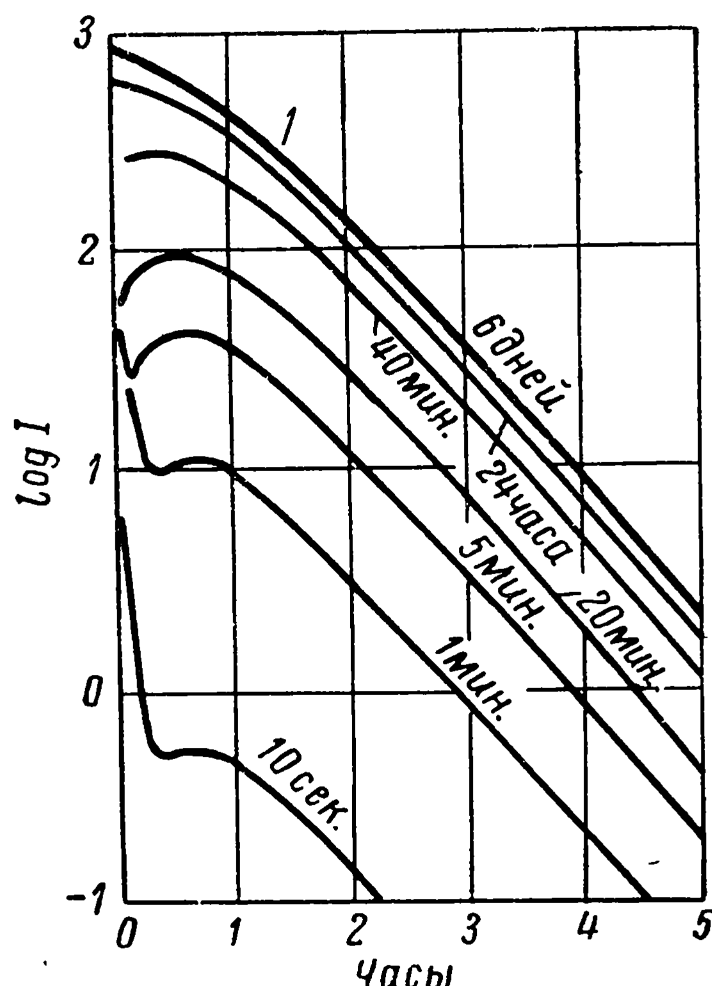
[3] Этот результат согласуется с тем, что было найдено Рамзаем с гелием, полученным из солей радия, растворенных в воде.

XXXVII

ОБ ИСЧЕЗНОВЕНИИ РАДИОАКТИВНОСТИ, НАВЕДЕННОЙ РАДИЕМ НА ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. ДАННОМ)

В одной из предыдущих работ [1] мы исследовали закон, согласно которому происходит уменьшение во времени излучения Беккереля твердого тела, подвергнутого в течение некоторого времени действию эманации радия. Приведенный здесь рисунок дает результат этих опытов. Логарифмы интенсивности I излучения откладываются по оси ординат; время отложено по оси абсцисс; оно отсчитывается с момента, когда пластинку избавляют от действия эманации. Время, в течение которого тела остаются под действием эманации, отмечено на каждой кривой. Кривая (*1*) есть предельная кривая, которая получилась бы, если бы тело было подвергнуто действию эманации в течение очень долгого времени. Мы нашли, что в этом случае интенсивность излучения в процессе дезактивации пластинки в зависимости от времени t выражается разностью двух экспоненциальных функций. Мы имеем



$$I = I_0 [-(k-1) e^{-bt} + ke^{-ct}], \qquad (1)$$

где $k = 4.2$; $b = 0.000538 = \frac{1}{1860}$; $c = 0.000413 = \frac{1}{2420}$.

Можно теоретически объяснить эти результаты, если принять точку зрения Резерфорда и представить себе, что эманация, действуя на твер-

---

[1] P. Curie, J. Danne, C. r., 136, 364, 1903. [Наст. изд., стр. 281].

дые стенки, создает некоторое радиоактивное вещество В, которое самопроизвольно исчезает, следуя простому экспоненциальному закону с коэффициентом b. Исчезая, вещество В порождает некоторое новое радиоактивное вещество С, которое в свою очередь исчезает по простому экспоненциальному закону с коэффициентом c. Если принять, что оба вещества В и С испускают лучи Беккереля, то найдем, что полное излучение должно следовать выражению (1). Значение коэффициента k зависит от испускательной способности веществ В и С в отношении лучей Беккереля.

В частном случае, когда предполагают, что излучает только одно вещество С, мы найдем, что должно быть

$$k = \frac{b}{b-c} = \frac{0.000538}{0.000538 - 0.000413} = 4.3.$$

Опыт дает для коэффициента k число 4.2; мы здесь имеем замечательное совпадение и видим, что все происходит так, как если бы вещество В не излучало, а преобразовывалось в некоторое вещество С, которое одно только и испускает лучи Беккереля. Следует заметить, что если

$$k = \frac{b}{b-c},$$

то формула (1) становится симметричной по отношению b и c. Таким образом, не изменяя формулы (1), можно переставить величины b и c. Можно поэтому высказать гипотезу I, предполагая, что $b=0.000538$, а $c=0.000413$, или гипотезу II, предполагая, что $b=0.000413$, а $c=0.000538$; закон дезактивации будет одинаково хорошо изображаться в обоих случаях.

По гипотезе I ($b>c$) неактивное вещество В исчезает быстрее вещества С; через несколько часов после начала дезактивации на поверхности тел остается только вещество С. По гипотезе II ($b<c$) вещество В уничтожается медленнее вещества С; но так как оно поддерживает вещество С, то оба вещества исчезают за одинаковое время при дезактивации, и смесь существует до тех пор, пока вся активность не исчезнет. Чтобы сделать выбор между обеими гипотезами, надо исследовать другие явления, вроде дистилляции активности при нагревании активных тел. Опыты, результаты которых мы тоже опубликуем, согласуются с первой гипотезой. Неактивное вещество В — это то, которое исчезает быстрее.

Можно расширить предыдущую теорию и спросить, каков закон дезактивации твердой стенки, которая была подвергнута действию эманации радия в течение определенного времени θ. В этом случае мы должны иметь

$$I = I_0\left[-\frac{c}{b-c}(1-e^{-b\theta})\,e^{-bt} + \frac{b}{b-c}(1-e^{-c\theta})\,e^{-ct}\right]. \qquad (2)$$

Формула (2) не учитывает первое падение интенсивности излучения, происходящего в первые минуты после кратковременной активации. Но зато по прошествии 20 мин. после начала дезактивации и до ее конца излучение, определяемое опытом, прекрасно представляется этой формулой.[2] В частности, на оси времени определен максимум интенсивности излучения, имеющий место во время дезактивации.

Чтобы выяснить все особенности кривых дезактивации, необходимо прибегнуть к трем различным веществам. Можно, например, предположить, что эманация создает первое вещество A, которое быстро исчезает по простому экспоненциальному закону с коэффициентом a, преобразуясь в вещество B; последнее в свою очередь преобразуется в вещество C. Результаты хорошо объясняются, если предположить, что A и C испускают лучи Беккереля, а вещество B не испускает его. Интенсивность излучения в период дезактивации задается тогда формулой

$$I = I_0 \Big[\lambda (1 - e^{-a\theta}) e^{-at} - \frac{c}{(b-c)} \cdot \frac{a}{(a-b)} (1 - e^{-b\theta}) e^{-bt} + \\ + \frac{b}{(b-c)} \cdot \frac{a}{(a-c)} (1 - e^{-c\theta}) e^{-ct} \Big],$$

где θ — продолжительность действия эманации, $\lambda=0.57$, $a=0.0045$, $b=0.000538$, $c=0.000413$. Время, необходимое для уменьшения количества каждого вещества наполовину, приблизительно равно 2.6 мин. для вещества A; 21 мин. — для вещества B и 28 мин. — для вещества C. Эти времена характеристичны для этих трех веществ.



[2] К сожалению, количество эманации, которое служило для активации тел, не было одним и тем же в разных опытах; это привело к тому, что можно было только определить форму кривых, но не их точное положение относительно делений оси ординат. Новые опыты были бы полезны.

XXXVIII

ЗАКОН ИСЧЕЗНОВЕНИЯ АКТИВНОСТИ, НАВЕДЕННОЙ РАДИЕМ, ПОСЛЕ НАГРЕВАНИЯ АКТИВИРОВАННЫХ ТЕЛ [1]

(СОВМЕСТНО С Ж. ДАННОМ)

Если нагреть до высокой температуры твердое тело (например, платиновую пластинку), которое было активировано эманацией радия, то его активность исчезает значительно быстрее, чем в том случае, когда пластинка удерживалась при комнатной температуре. Мисс Гейтс [1] показала, что тогда активность переносится на соседние с нагретой пластинкой тела; активность дистиллируется при высокой температуре. Мы изучили, каким образом происходит это явление. Мы сначала брали платиновые пластинки, продолжительное время активированные эманацией радия. Затем мы их нагревали в течение нескольких минут до высокой температуры и после этого изучали закон дезактивации при *комнатной температуре*.

Полученные результаты позволили нам построить кривые (рис. 1 и 2). Время отсчитывается от начала дезактивации и откладывается по оси абсцисс; по оси ординат отложены логарифмы интенсивности излучения ($\log I$). У каждой кривой обозначена та температура, при которой пластинку держали в течение нескольких минут до начала дезактивации.

Первая кривая (15°) соответствует нормальной кривой дезактивации ненагретой пластинки. Мы видим, что после нагревания до 215 и 540° для $\log I$ как функции времени получаются более выровненные кривые, чем нормальная кривая. После нагревания до температуры, более высокой, чем 630°, получаются прямые, что указывает на простой экспоненциальный закон дезактивации в форме $I=I_0e^{-c't}$. Угловой коэффициент прямых (пропорциональный c') характеризует быстроту дезактивации. Коэффициент c' изменяется вместе с температурой нагревания; он сначала увеличивается с температурой нагревания до 1100°, а затем умень-

[1] Gates, Phys. Rev., 16, 300, 1903.

шается. В таблице мы привели характеристическое время θ (в мин.), т. е. время, необходимое для падения активности наполовину.

Дезактивация нагретых пластинок			*Дезактивация пластинок, активированных путем дистилляции*		
Температура нагревания	c'	θ	Температура второй дистилляции	c'	θ
630°	0.000394	29.3	700°	0.000390	29.6
830	0.000470	24.6	1000	0.000490	23.4
1000	0.000550	21.0			
1100	0.000570	20.3			
1250	0.000480	24.1			
1300	0.000454	25.4	1400	0.00040	28.6

Мы также исследовали закон дезактивации тел, активированных путем дистилляции. Платиновая проволочка продолжительное время активиро-

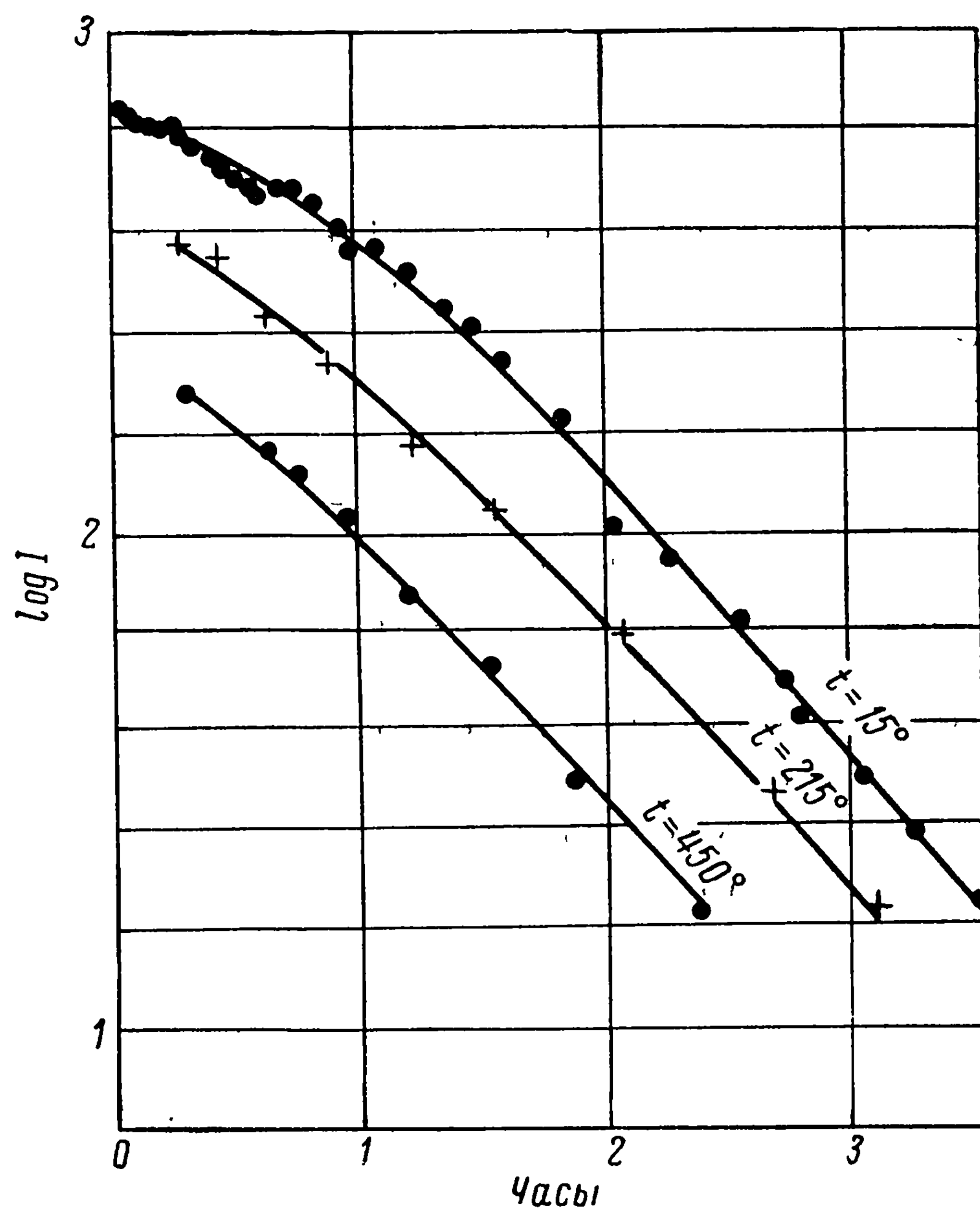


Рис. 1. Дезактивация нагретых пластинок.

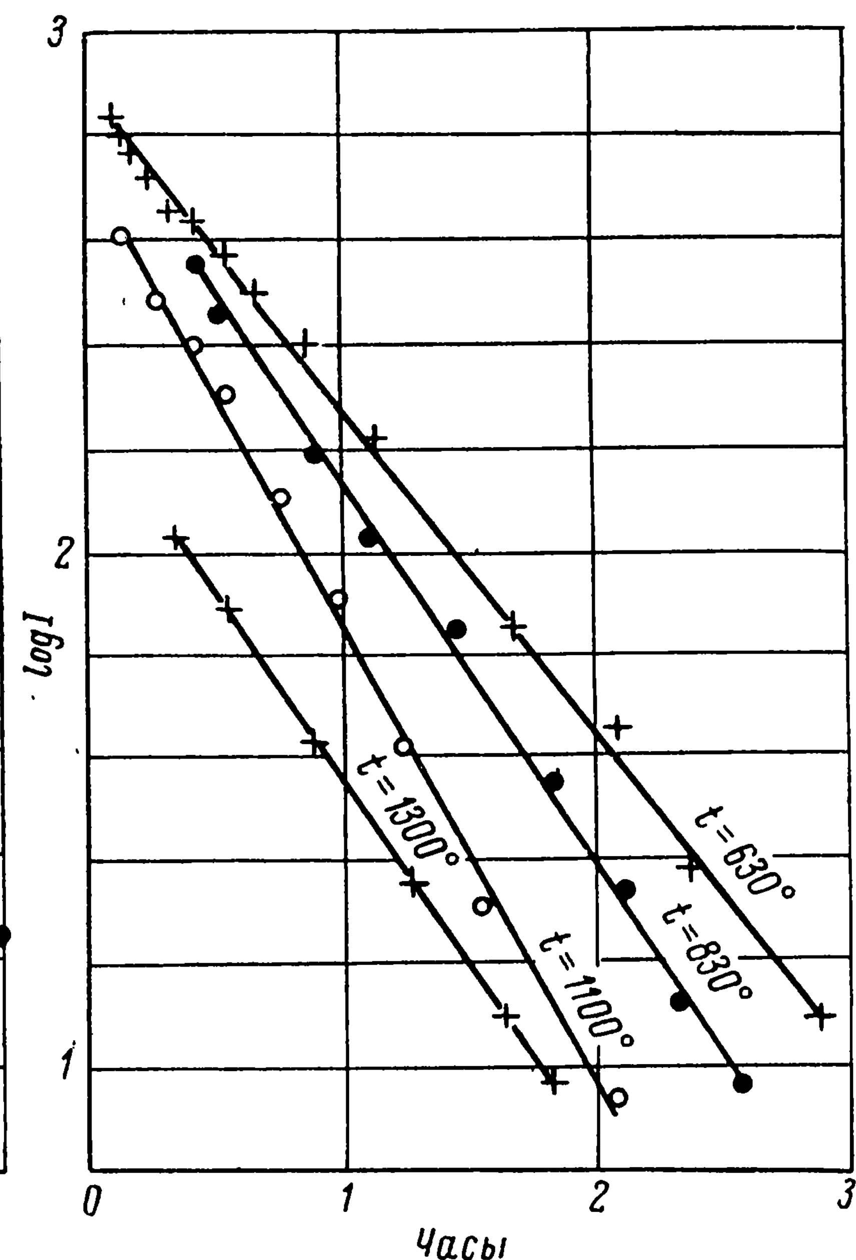


Рис. 2. Дезактивация нагретых пластинок.

валась эманацией радия (при отрицательном напряжении в 500 в). Затем она закреплялась вдоль оси платинового цилиндра и с помощью электрического тока удерживалась при высокой температуре. Цилиндр при этом

активировался; затем проволочка удалялась, и исследовался закон дезактивации цилиндра, развернутого в пластинку. Результаты представлены на рис. 3 и 4; кривые *1*, *2*, *3*, *5* показывают, что закон дезактивации не может быть представлен простой экспоненциальной функцией; кривая активности проходит даже через максимум.

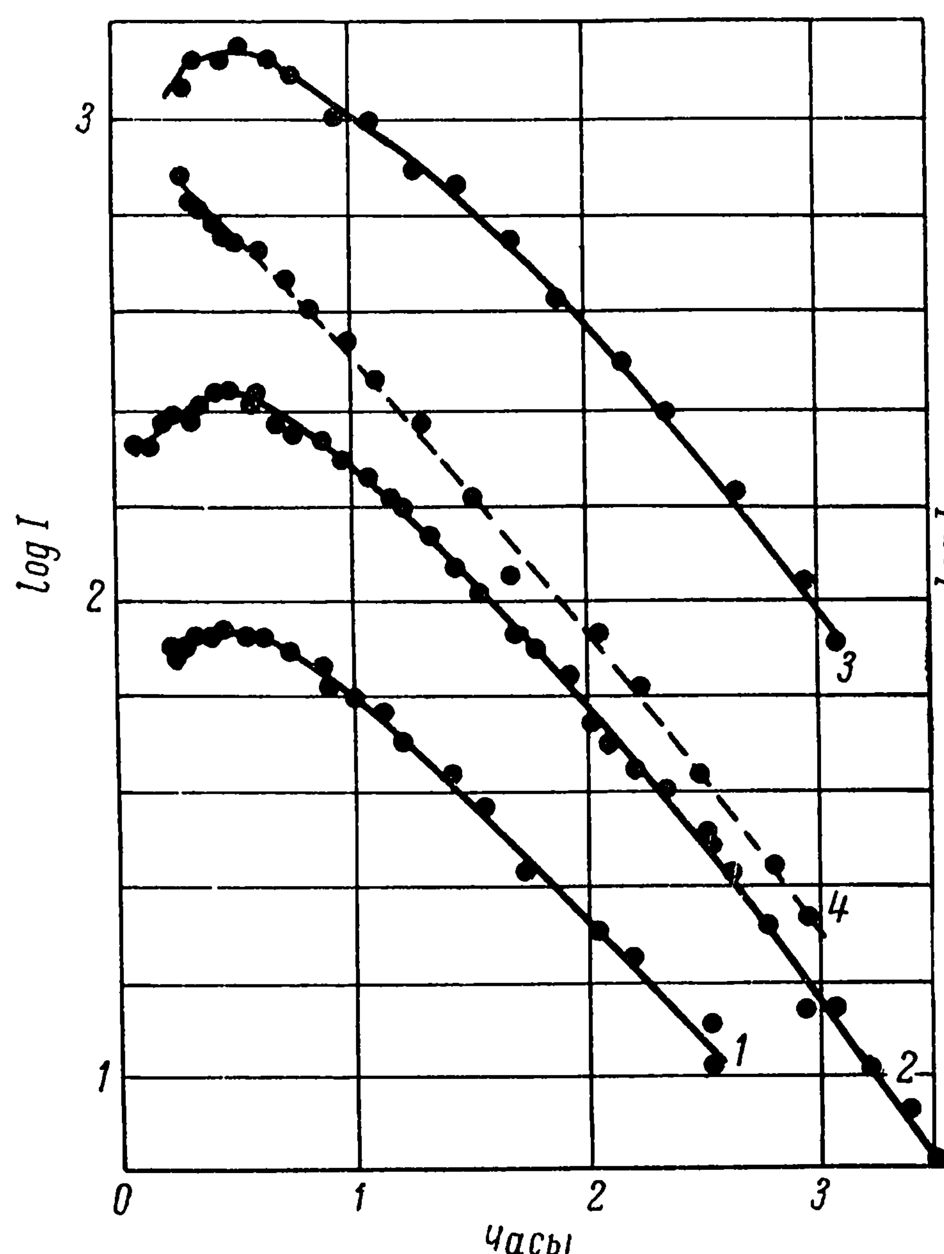


Рис. 3. Дезактивация пластинок, активированных путем дистилляции.

1 — дистилляция при 150°; *2* — то же при 600°; *3* — частичная дистилляция при 500°; *4* — вторая дистилляция при 700°

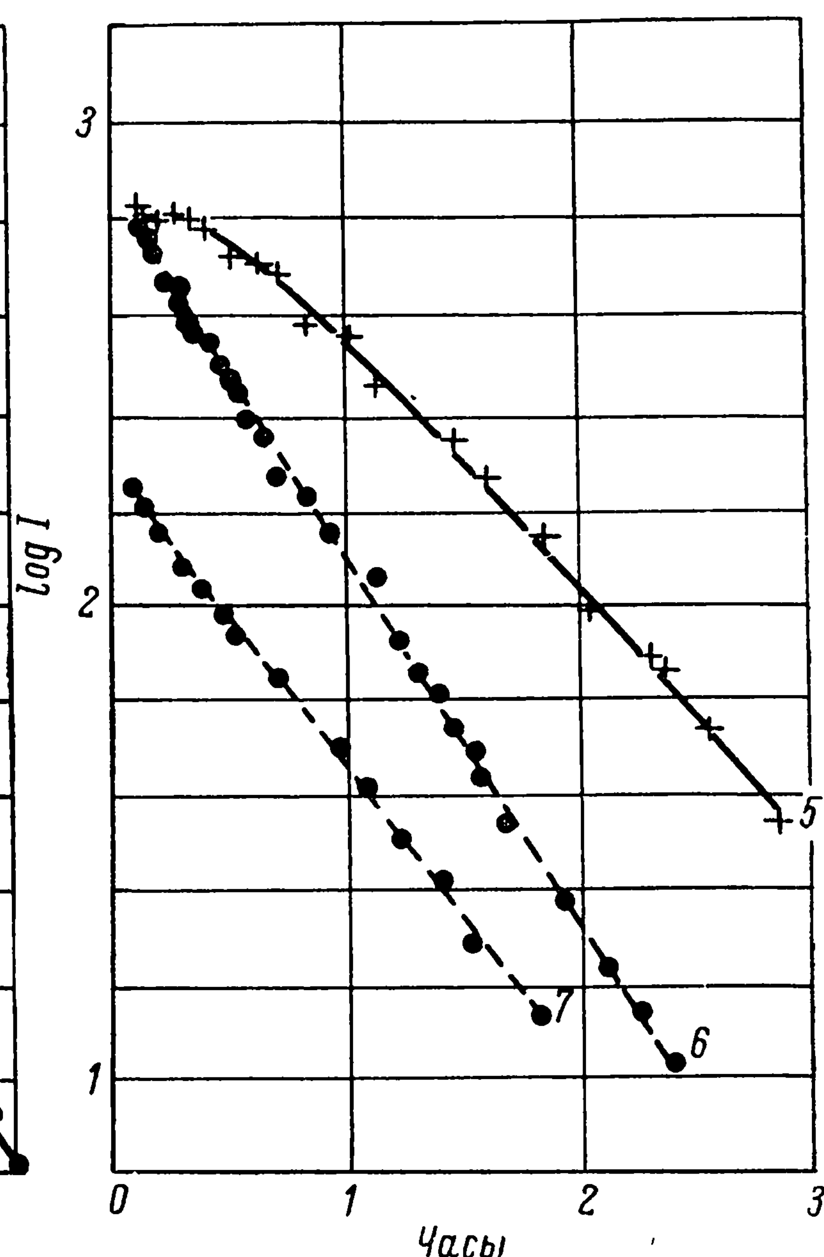


Рис. 4. Дезактивация пластинок, активированных путем дистилляции.

5 — дистилляция при 1000°; *6* — частичная дистилляция при 700°, вторая дистилляция при 1000°; *7* — частичная дистилляция при 1000°, вторая дистилляция при 1400°.

Мы также производили два последовательных нагревания проволочки в двух различных цилиндрах и изучали активность, дистиллированную при втором нагревании. Результаты экспериментов, представленные кривыми *4*, *6* и *7*, показывают, что активность второй дистилляции, следующей за первым нагреванием выше 600°, представляется прямыми; в этом случае получаем экспоненциальный закон дезактивации. В приведенной выше таблице даны значения коэффициента c' показательной функции и характеристического времени θ, соответствующие различным температурам второй дистилляции.

На последнем заседании Академии наук мы сообщили, что можно объяснить закон дезактивации активированного тела, исходя из предположения, что на поверхности тела существует три различных вещества А, В, С, которые изменяются в зависимости от времени. Мы видели, что несколько гипотез позволяют объяснить закон дезактивации при комнатной температуре. Одна из них очень хорошо подходит для объяснения результатов, полученных при нагревании пластинок до температур, меньших 650°. Вот в чем состоит эта гипотеза: вещество А, исчезающее за несколько минут, не играет роли в последних опытах; вещество В не испускает лучей Беккереля, оно преобразуется в С и оно более летуче, чем С; вещество С испускает лучи Беккереля. Коэффициенты b и c экспоненциальных функций, которые определяют исчезновение В и С, соответственно равны: b=0.000538 и c=0.000413. Если нагревать активированную пластинку, например, до 215, 540 и 630°, то только вещество В дистиллируется, содержание же С на нагреваемой пластинке увеличивается; при этом кривые дезактивации стремятся превратиться в прямые. После нагревания до 630° остается на нагретой пластинке только вещество С, а закон дезактивации есть простой экспоненциальный закон с коэффициентом c'=0.000394, который мало отличается от коэффициента c= =0.000413.

В то время как активированное тело нагревают до температуры ниже 600°, В дистиллируется на соседние тела, оно преобразуется в С, которое в свою очередь исчезает, испуская лучи Беккереля. Количество вещества С на активированном дистилляцией теле было сначала равно нулю, затем оно проходит через максимум и после этого стремится асимптотически к нулю. То же самое должно происходить и с излучением, что и подтверждается экспериментом. Теория показывает, что максимум должен возникать по истечении 35.7 мин., это число недалеко от того, которое дает опыт. Хотя вещество С менее летуче, чем В, оно все-таки частично дистиллируется при 600°. Это можно установить с помощью пластинок, активированных двумя последовательными нагреваниями одной и той же проволочки (рис. 3, кривые *3* и *4*). Тело В почти полностью дистиллируется при первом нагревании до 500°, тело С дистиллируется почти только при втором нагревании до 700° (кривая *4*), причем так, что пластинки, активированные второй дистилляцией, ведут себя почти так, как если бы они содержали только тело С [2].

Если нагревать активированные пластинки выше 700°, то возникают явления, не предусмотренные предыдущей теорией. Вещество С, по-видимому, изменяет свои свойства, которые мы предполагали характеризующимися коэффициентом, указывающим скорость в законе дезактивации.

Мы видели, что коэффициент c' равен 0.0004 (т. е. равен коэффициенту c), когда температура нагревания была 630°. Если нагревать до более высокой температуры, то c' увеличивается, проходит через макси-

мум, затем уменьшается. Сверх того видно (см. таблицу, рис. 4, кривые *6*, *7*), что вещество, дистиллирующееся при втором нагревании, повидимому, имеет те же свойства, что и вещество, остающееся на нагретой пластинке.

Описанные опыты показывают, что свойства наведенной на какуюлибо пластинку радиоактивности могут изменяться при изменении температуры.



XXXIX

ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭМАНАЦИИ РАДИЯ[1] [1]

(СОВМЕСТНО С Ш. БУШАРОМ И В. БАЛЬТАЗАРОМ [2])

В течение февраля мы изучали физиологическое действие эманации радия на мышах и морских свинках. Экспериментальные приемы, которыми мы пользовались, состояли в том, что мы заставляли животных жить в замкнутом пространстве, зараженном эманацией, регенерируя спертый воздух без потери им эманации.

Расположение опыта. Флакон вместимостью в 2 л был отшлифован в своей верхней части и снабжен трубкой с краном. Этот флакон до одной трети своей высоты заполняли большими кусками калиевой пемзы; затем вводили подставку, благодаря которой животное, мышь или маленькая морская свинка, могло находиться в верхней части флакона.

Флакон сообщался с трубкой Клоца, которая сама была соединена с большим баллоном, наполненным кислородом. Животное дыша производило углекислый газ, поглощаемый калием; это вызывало уменьшение давления во флаконе, что отмечалось в трубке Клоца, и несколько пузырьков кислорода переходило из баллона во флакон, пополняя кислород, потребленный животным.

Давление кислорода в баллоне поддерживалось постоянным при помощи следующего устройства: баллон в своей верхней части был заткнут пробкой с двумя отверстиями, через одно из которых проходит трубка, идущая к трубке Клоца, через другое отверстие пропущен заостренный конец второй трубки, которая является нижним горлышком сосуда Мариотта. Таким образом, когда благодаря переходу части кислорода во флакон давление в баллоне уменьшается, вода из сосуда Мариотта начинает перетекать в баллон до тех пор, пока не восстановится первоначальное давление.

Благодаря боковой трубочке, помещенной между флаконом и трубкой Клоца, эманацию легко вводить во флакон в начале опыта после

---

[1] Во время этих опытов Е. Лондон опубликовал результаты, полученные им на лягушках по действию эманации, получаемой от 10 мг радия; смерть наступала через 5 дней [3].

того, как давление во флаконе понижено на несколько сантиметров ртутного столба. Два сходных прибора были, кроме того, присоединены к тому же кислородному баллону, один из которых был предназначен для помещения в нем контрольного животного в каждом опыте.

Действие эманации на мышей и морских свинок. По прошествии некоторого времени, которое в зависимости от количества эманации менялось от 1 часа до нескольких часов, у животных наблюдались некоторые дыхательные симптомы; дыхание становилось прерывистым, выдыхание — кратким, а промежутки между вздохами удлинялись. В то же время животное съеживалось, становилось неподвижным, а шерсть его вставала дыбом. Позже животное впадало в состояние оцепенения и холодело; дыхательные движения сохраняли свой характер, но их частота сильно уменьшалась, и за час до смерти можно было отметить всего лишь 10, 8 или даже 6 вздохов в 1 мин. Хотя животные оставались совершенно неподвижными и обессиленными, паралича, собственно говоря, не было, так как сильные раздражения всегда вызывали рефлекторные движения; имело место даже в некоторой степени сведение конечностей и временами конвульсии.

Опыты. 1°. Мышь была помещена во флакон вместимостью 2 л, куда было введено 15 грамм-часов [2] эманации; смерть последовала через 9 час. В действительности эманация занимала объем 1.5 л, если учесть объем животного и объем калийной пемзы. Контрольная же мышь была извлечена из другого флакона через 24 часа, не испытав никаких расстройств.

2°. Мышь была помещена во флакон, содержащий 28 грамм-часов эманации; смерть последовала через 6 ч. 30 м. Эта мышь была заменена другой мышью, которая погибла через 8 час. Эта немного бо́льшая продолжительность жизни объясняется тем, что эманации несколько рассеялись из флакона в тот момент, когда заменяли первую мышь второй.

3°. Во флакон, где находилась мышь, было введено 50 грамм-часов эманации; эта мышь погибла через 4 часа. Контрольная мышь выжила.

4°. Морская свинка была помещена во флакон с 15 грамм-часами эманации; она погибла через 9 час. Контрольная мышь, находившаяся во втором флаконе, осталась живой после 24-часового пребывания в нем.

5°. Морская свинка была подвергнута действию эманации в 20 грамм-часов. Она погибла через 7 час.

Из этих опытов видно, что при прочих равных условиях смерть животных наступает тем быстрее, чем больше интенсивность эманации во флаконе.

Можно было бы думать, что смерть вызвана токсическим действием озона; когда эманация сохраняется в замкнутом сосуде, содержащем кислород, то действительно образуется большое количество озона. В том флаконе, который служил для опытов, это явление имело место, однако благодаря присутствию калийной пемзы этот озон почти сразу же переходил

[2] Грамм-час — единица эманации радия, соответствует количеству эманации, излученной за 1 час раствором 1 г бромистого радия.

в кислород. Проба газа, бравшаяся из флакона или во время опыта, или в конце его, действительно показывала, что имелись следы озона, воспринимаемые по его запаху; однако определение его содержания, произведенное путем измерения щелочности раствора йодистого калия, соприкасающегося с газом, показывает, что содержание озона не превышает одной части на 1000. Прямые же опыты, в которых кислород до ввода во флакон проходил через трубку озонизатора, показали, что требуется 24 часа, чтобы убить мышь, причем содержание озона в замкнутом пространстве постоянно превышало 2%, т. е. было в 20 раз выше, чем в наших исследованиях действия эманации.

Поражения, наблюдаемые у животных. Главное из них — сильное воспаление легких. Для невооруженного глаза легкие с их наружной стороны представлялись покрытыми красными пятнами, отделенными розовыми промежутками. В микроскоп наблюдается значительное расширение сосудов и капилляров, а также несколько маленьких пузырьков эмфиземы. Тем не менее не было промежуточных или альвеолярных кровоизлияний; эпителий альвеол и бронхов не был поражен.

Кровь испытывает изменения, касающиеся прежде всего лейкоцитов, число которых сильно уменьшается; тем не менее процентное содержание различных видов лейкоцитов почти не изменялось. Эти уничтоженные лейкоциты были обнаружены в макрофагах селезенки.

Не существует микроскопически грубых изменений в печени, почках и в мозгу, кроме довольно заметного прилива крови.

Отвердение трупа начинается в момент смерти, а сердце находится в состоянии систола.

Радиоактивность тканей организма. Ткани животных, подвергнутые действию эманации, становятся радиоактивными. Тело морской свинки, помещенное на закрытую черной бумагой фотографическую пластинку, создает на ней отпечаток, на котором шерсть проявляется очень четко.

Мы исследовали фотографическим методом по истечении трех часов после смерти радиоактивность различных тканей организма; все они радиоактивны, но в различной степени. Наибольшую радиоактивность имеют шерсть, волосы; обритая кожа менее радиоактивна, глаза тоже.

Интенсивность почти одинакова у почек, сердца, печени, селезенки и мозга; она, что весьма любопытно, много больше у надпочечников и особенно у легких.

Это радиоактивное действие зависит от двух причин: от наведенной радиоактивности тканей и от присутствия эманации, растворенной во влаге организма; интересно исследовать их отдельно.

В итоге, исключая ошибки, обусловленные замкнутостью атмосферы и образованием озона, мы установили реальность токсического действия эманации радия, введенной через дыхательные пути и действующей на кожный покров. Добавим, что мы не имели возможности наблюдать вредоносное действие, вводя эманацию с газом в брюшину морских свинок или кроликов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Творческая жизнь Пьера Кюри была непродолжительна — всего 26 лет. Трагический несчастный случай оборвал ее, когда ему было только 47 лет.

По своему объему его научное наследие невелико. Однако за 26 лет он успел сделать ряд выдающихся открытий, вызвавших переворот в основных представлениях физики, он успел провести ряд замечательных исследований, оказавшихся в высшей степени плодотворными для последующего развития физики.

В 1908 г., через два года после его смерти, Французское физическое общество издало однотомник его научных трудов: Oeuvres de Pierre Curie. Publiées par les soins de la Société Française de Physique (Paris, 1908, XXII+621 стр.), подготовленный к печати под редакцией Анри Абраама (тогдашнего генерального секретаря Французского физического общества), Поля Ланжевена, Шенево и Сэва. В этот однотомник вошла 61 работа. Редакторы французского издания включили в это число также несколько статей, принадлежащих перу других авторов; в этих статьях описаны приборы, придуманные П. Кюри, но нигде им самим не опубликованные. Ведь Пьер Кюри был не только блестящим экспериментатором-исследователем, но и изобретательным конструктором приборов.

Настоящее издание трудов П. Кюри содержит 39 его важнейших работ по физике и кристаллографии. Они сгруппированы в четыре раздела: 1) работы по пьезоэлектричеству (перевод И. Г. Русакова); 2) работы по симметрии и кристаллографии (перевод акад. Н. Н. Андреева — статья XII, И. Г. Русакова — статья XI и Л. С. Сазонова — статьи IX и X); 3) работа по исследованию магнитных свойств тел (перевод акад. Н. Н. Андреева и И. Г. Русакова) и 4) работы и статьи по радиоактивности (перевод К. Н. Шапошникова).

В разделе «Приложения» помещен перевод извлечения из диссертации Жака Кюри, описывающего разработанный обоими братьями Кюри «пьезоэлектрический кварц» — прибор, который играл важную роль в работах Марии и Пьера Кюри по радиактивности и часто упоминается в их статьях.

В этом же разделе помещен, кроме того, краткий очерк о жизни Пьера Кюри и обзор его научных работ. Хотя описанию жизни и деятельности

Пьера Кюри посвящены ряд книг и статей,[1] наличие которых делает ненужным включение в настоящее издание сколько-нибудь обстоятельного жизнеописания Пьера Кюри, однако это издание было бы не полным, если бы в нем не было самого краткого очерка, дающего общую канву его жизни и обзора трудов.

Краткая биография П. Кюри написана академиком Н. Н. Андреевым и Л. С. Сазоновым. Обзор научных работ П. Кюри написан Л. С. Сазоновым; им же написаны Примечания и составлена Библиография трудов П. Кюри.



[1] На русском языке имеются следующие биографии П. Кюри: М. Кюри. Пьер Кюри. Пер. С. А. Щукарева. Л., 1924 (вторично издано в серии «Жизнь замечательных людей», вып. 5 (271). М., 1959); Акад. Н. Н. Андреев. Пьер Кюри. Вест. АН СССР, 29, № 5, стр. 56, 1959. Э. В. Шпольский. Жизнь и деятельность Пьера Кюри (1859—1906). Усп. физ. наук, 58, вып. 4, 1959; О. А. Старосельская-Никитина. Жизнь и творчество Пьера Кюри. Тр. Инст. истории естеств. и техн., 19, 13, 1957.

КРАТКАЯ БИОГРАФИЯ П. КЮРИ

Пьер Кюри родился 15 мая 1859 г. Он был вторым сыном врача Эжена Кюри (1827—1910). Его брат Жак Кюри (1855—1941) (о нем см. стр. 382) был старше его на 3 $^1/_2$ года. Влияние отца на развитие Пьера было велико и плодотворно. Эжен Кюри имел сильное влечение к естественным наукам и проявлял склонности исследователя. Он сожалел, что трудные материальные обстоятельства не позволили ему всецело посвятить себя науке. До конца жизни он сохранил любовь к науке, которую он сумел внушить обоим своим сыновьям. Это был также человек высоких моральных принципов и твердых политических убеждений — республиканец и антиклерикал, участник революции 1848 г. В дни Парижской коммуны он в качестве врача содействовал коммунарам. Свои убеждения он передал своим сыновьям. Он решил не сковывать своих сыновей рамками школьной дисциплины и предоставил им развиваться свободно. Оба брата получили домашнее воспитание. С Пьером сперва занималась мать, потом отец. Только когда Пьеру исполнилось 14 лет, он был доверен прекрасному педагогу А. Базилю, преподававшему ему основы математики и немного латыни. Следуя своим собственным влечениям и вкусу, Эжен Кюри стремился развить в своих сыновьях любовь к природе и привить умение наблюдать ее.

Пьер был юношей мечтательным, несколько медлительного характера, любил уединение, был склонен к размышлениям. Возможно, что только эти своеобразные черты его характера были причиной того, что полученное им воспитание, часто проходившее довольно беспорядочно, дало хорошие плоды. Сам Пьер всегда оставался благодарен своим родителям за такое либеральное и индивидуальное воспитание.

Базиль дал ему основы математики; углубленное знание ее он приобрел уже самостоятельно. Даже будучи студентом, он не прослушал полного систематического курса высшей математики, но изучил ее путем самообразования.

В 16 лет Пьер сдал экзамен на аттестат зрелости и получил диплом бакалавра естественных наук. С 1875 г. он начал слушать лекции в Сорбонне. Одновременно он стал работать в лаборатории профессора Леру в Фармацевтическом институте в качестве помощника ассистента по кафедре фи-

зики. В 18 лет Пьер получил степень лиценциата физики. В 1878 г., когда ему было 19 лет, он был приглашен профессором Дезеном на должность ассистента на факультет естествознания Парижского университета. Здесь ему было поручено вести практикум по физике. Эту должность он занимал в течение пяти лет до 1883 г. В этой лаборатории он выполнил свою первую работу совместно с профессором Дезеном по определению длины волны инфракрасных лучей, испускаемых зачерненной медной пластинкой при 150 и 300°, опубликованную в 1880 г.

В 1878 г. началась совместная работа Пьера и Жака Кюри по изучению свойств кристаллов. Ж. Кюри работал в то время в минералогической лаборатории Сорбонны ассистентом профессора Фриделя. Вскоре два юных физика (Пьеру было 21 год, Жаку — 24) сделали важное открытие — явления пьезоэлектричества: выделения электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов, лишенных центра симметрии, при их сжатии или растяжении. Они не ограничились только сообщением о сделанном ими открытии нового явления, но подвергли его всестороннему изучению и установили количественные законы, которым оно подчиняется, и даже сумели его использовать для практических целей, а именно, создали прекрасный измерительный прибор — «пьезоэлектрический кварц» (описанный в диссертации Ж. Кюри, см. стр. 373) для измерения электрических зарядов и малой силы тока, который затем с большим успехом был использован Пьером и Марией Кюри в их работах по исследованию радиоактивности.

В 1883 г. систематическая совместная работа братьев прекратилась: Жак переехал в Монпелье, где стал руководителем практических работ по минералогии; Пьер в том же году был назначен руководителем практических работ по физике в только что открытой Школе промышленной физики и химии, основанной Парижским муниципалитетом.

Новая должность отвлекла Пьера от экспериментальных исследований. В создаваемой Школе пришлось организовать для практических занятий студентов все с самого начала. Сами занятия и подготовка к ним забирали много времени. Прервав экспериментальные исследования, Пьер Кюри пополнил в эти годы свои математические знания и обратился к теоретическим вопросам: в это время он особенно углубленно занимался вопросами симметрии, применительно к столь любимой им кристаллографии. Плодом этих размышлений явились две большие работы по вопросам повторяемости (1884 г.) и симметрии (1885 г.), а также небольшая, но содержательная работа о роли капиллярных постоянных граней в образовании и росте кристаллов (1885 г.).

Только в конце 80-х годов возобновилась совместная работа Пьера и Жака, но проходила она не систематически, а только во время каникул, когда Жак мог приезжать в Париж. Они обратились к обнаружению и исследованию обратного явления пьезоэлектричества, заключающегося в деформации кристаллов под действием электрического поля и предсказанного еще в 1881 г. теоретически Липпманом, исходившим из принципов



P. Curie

сохранения энергии и сохранения электричества. Эта работа потребовала от обоих братьев применения более тонких средств наблюдения. Ее выполнению содействовало также то, что Дезен и Мутон предоставили им отдельную комнату в Физической лаборатории университета. Предсказанное явление было обнаружено, подробно изучено и использовано для создания нового измерительного прибора большой чувствительности — биkварцевой пластинки — для измерения высоких электрических напряжений. В 1895 г. братьям Кюри за их работу по изучению физических свойств кристаллов была присуждена премия Плантэ.

Свое изучение симметрии Пьер Кюри завершает в эти годы рассмотрением симметрии физических явлений и формулировкой общего принципа симметрии и публикацией в 1894 г. нескольких интереснейших статей по этому вопросу (1894 г.). Хотя после этих статей П. Кюри уже больше не публикует работ, посвященных кристаллофизике и учению о симметрии, но эти вопросы продолжают его занимать; в последние годы своей жизни он собирался вновь полностью отдаться им.

В конце 80-х и начале 90-х годов Пьер Кюри много времени посвящает вопросам теории и конструкции приборов: динамометр с оптическим отсчетом (1886 г.), квадрантный электрометр (1886—1889 г.), точные апериодические весы (1890 г.). В 1891 г. он публикует обширное исследование о затухающих колебательных движениях применительно к измерительным приборам.

В том же году он приступает к обширному исследованию магнитных свойств вещества при разных температурах. Это классическое исследование, ставшее важной вехой в истории изучения магнетизма и завершенное им в 1895 г., составило содержание его диссертации, защищенной им на Факультете естествознания Парижского университета.

В 1895 г. Пьер Кюри женился на Марии Склодовской, ставшей самым близким другом и сотрудником Пьера. Чета Кюри, объединив свои силы и способности, совершили выдающийся научный подвиг — открыли радиоактивные элементы, изучили их основные свойства и стали, таким образом, в ряды первооткрывателей новой области физики — физики атомного ядра.

До 1895 г. Пьер Кюри занимал должность руководителя практических работ в Школе промышленной физики и химии. Эта должность давала ему скромный заработок, который вполне удовлетворял его. Его должность оставляла ему время и для научных исследований. Он был очень увлечен своей работой и чувствовал себя вполне счастливым среди своих друзей и учеников. Только отсутствие подходящего помещения для проведения исследований постоянно удручало его.

Появление семьи и связанное с этим увеличение расходов заставили Кюри искать возможности для улучшения материального положения. По настоянию известного физика Маскара в Школе физики и химии была учреждена новая кафедра физики, специально для Пьера Кюри. Это улуч-

шило его материальное положение, но ничего не изменило в условиях работы, продолжавших оставаться неудовлетворительными.

На новой кафедре никакой определенной программы установлено не было; Пьеру Кюри была предоставлена полная свобода. Он создал серьезный курс электричества, рассчитанный на 120 лекций, отличавшийся большой полнотой, новизной материала, точностью и ясностью изложения. Свое намерение напечатать этот курс ему не удалось осуществить. Подготовка этого курса требовала большой работы, однако Пьер Кюри не оставлял экспериментальных исследований и приступил к новой работе по изучению роста кристаллов. Он хотел обнаружить и измерить различие скорости роста и растворения разных граней кристалла. Ему удалось получить уже некоторые результаты, но они не были опубликованы, а сама работа была оставлена, как Пьер Кюри предполагал, на время. Он решил принять участие в работе Марии Кюри по радиоактивности. Это было в 1897 г.

В июле 1898 г. Пьер и Мария Кюри сделали сообщение об открытии ими полония, а в декабре того же года вместе с их сотрудником Бемоном — сообщение об открытии ими радия. В продуктах, полученных ими путем фракционирования, полоний и радий содержались только в виде незначительных примесей к висмуту и барию. Их целью стало добыть полоний и радий в чистом виде. Для этого надо было обработать громадные количества сырого материала. Благодаря посредничеству профессора Зюсса и Венской академии наук австрийское правительство согласилось отпустить им безвозмездно тонну отходов урановых руд. Для обработки всего этого количества в Школе физики и химии им был предоставлен заброшенный сарай, про который Мария Кюри позже писала: «. . .как раз в этом-то дрянном старом сарае протекли лучшие и счастливейшие дни нашей жизни, всецело посвященные работе».[1] В нем супруги Кюри работали с 1898 по 1902 г. Сперва они работали вместе над выделением полония и радия и измерением интенсивности излучения получаемых продуктов. Затем они нашли, что целесообразнее разделить работу: Мария проводит обработку руд, стремясь получить чистые соли радия, Пьер изучает свойства радия. Каждый год, начиная с 1898 г., они публикуют ряд работ либо вместе, либо отдельно, либо совместно с другими сотрудниками. В 1893 г. имя Пьера Кюри как одного (или даже единственного) из авторов указано в двух работах, в 1899 г. — тоже в двух, в 1900 г. — в пяти, в 1901 г. — в шести, в 1902 г. — в четырех, в 1903 г. — в пяти, в 1904 г. — тоже в пяти и в 1906 г. — в одной.

На Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 г. они прочли обзорный доклад о результатах исследования радиоактивных веществ, вызвавший громадный интерес среди ученых. К этому времени все больше расширяется число ученых, занимающихся исследованием радиоактивно-

---

[1] P. Curie, Oeuvres, Paris, 1908, p. VII.

сти. Мария и Пьер Кюри нуждаются в помощниках. Сперва им помогал только лабораторный служитель. В 1898 г. временную помощь им оказывал начальник работ Школы промышленной физики и химии Бемон. С 1900 г. им согласился помогать Андре Дебьерн, тогда препаратор профессора Фриделя. Дебьерн открыл новый радиоактивный элемент — актиний, существование которого предполагалось в группе железа и редких земель.

Преподавательская нагрузка Пьера Кюри не давала возможности посвящать исследовательской работе столько времени, сколько бы он хотел. Он сам и его друзья стремились улучшить его положение. Так, еще в 1898 г. открылась Кафедра физической химии в Сорбонне. Друзья уговорили его выставить свою кандидатуру, однако, несмотря на старание таких авторитетных профессоров, как Липпман, Бути и Пелла, его кандидатура не прошла. Одним из доводов против Кюри было то, что его работы за последние годы не относились собственно к физической химии.

В 1900 г. пришло предложение занять кафедру физики в Женевском университете. Это предложение было весьма заманчиво, так как при этом ему предлагалось руководство лабораторией с двумя ассистентами. В той же лаборатории предоставлялось штатное место для Марии Кюри. П. Кюри сперва согласился принять это предложение, но после некоторых раздумий отказался: это потребовало бы длительного перерыва в исследовании радиоактивности, которые он не хотел прерывать.

Благодаря дружескому содействию Анри Пуанкаре, стремившемуся удержать Пьера Кюри во Франции, удалось получить кафедру физики на подготовительном курсе Сорбонны (так называемом факультете P. C. N. — Physique, Chimie, Naturel). Одновременно Мария Кюри получила должность преподавательницы в Высшей женской нормальной школе в Севре (близ Парижа). Новые должности отнимали много времени у обоих и сильно отвлекали их от исследовательской работы. Чета Кюри много времени проводит над учебниками, придумыванием задач и курсовых работ, каждый для своих учеников.

В 1902 г. по инициативе Маскара П. Кюри выставил свою кандидатуру в Академию наук. Физическое отделение Академии единогласно высказалось за Кюри. Однако при голосовании на общем собрании Кюри получил 20 голосов, другой кандидат — Амага — 23 голоса.

Чтобы придать Пьеру Кюри больший вес в официальных кругах Франции, Поль Аппель просил Кюри согласиться на представление его к награждению орденом «Почетного легиона». Кюри отказался от этого предложения и в ответном письме просил Аппеля передать министру благодарность и осведомить его, что он, Кюри, «не нуждается в орденах, но весьма нуждается в лаборатории».

В 1899 г. Пьер Кюри приступил к организации промышленной добычи радия, воспользовавшись для этого помощью Центрального общества химических продуктов. При незначительности средств, которыми располагал П. Кюри, это начинание было очень ограничено по своим масштабам.

Супруги Кюри не взяли никакого патента на открытый ими способ извлечения чистого радия и полностью обнародовали результаты своих исследований. Они не хотели извлекать из своих открытий никаких личных выгод и, наоборот, стремились к тому, чтобы производство радия могло свободно развиваться для целей его дальнейшего исследования и использования его врачами, которые стали к этому времени очень им интересоваться как лечебным средством. В 1902 г. Академия наук отпускает супругам Кюри 20 000 франков на расширение работ по выделению радиоактивных веществ. В 1904 г. благодаря инициативе одного крупного французского промышленника (Арме де Лиль) был основан завод для получения радия и снабжения им врачей для лечения злокачественных опухолей.

Пьер и Мария с большим напряжением продолжают совмещать увлекательную работу в своем сарае-лаборатории с обременительным преподаванием. Такое перенапряжение сил привело их обоих к сильному истощению и заставило даже Пьера слечь в постель.

К этому времени исследование радиоактивности быстро развивалось. Новые открытия быстро следовали одно за другим. Работа в этой новой области неизбежно была связана с некоторой спешкой. Каждое новое открытие выдвигало новые гипотезы, которые необходимо было быстро проверить. Мария Кюри писала: «Он не мог освоиться с ходом работы, требовавшим спешного печатания, и чувствовал себя счастливым в области, где спокойно работают немногие исследователи».[2]

Однако именно работы по радиоактивности высоко подняли авторитет Пьера Кюри в академических кругах и в официальном мире и принесли наибольшую известность в широких кругах всего мира.

Признание пришло сперва из-за границы.

В июне 1903 г. Королевский институт в Лондоне пригласил Пьера Кюри прочесть доклад о радии на торжественном заседании института. Ему и его жене английскими учеными во главе с лордом Кельвином был оказан восторженный прием. В Лондоне П. Кюри завязал дружеские отношения с Дьюаром и позже вместе с ним выполнил и опубликовал работу о выделении тепла радием при низких температурах и об образовании гелия в солях радия.

В том же году Королевское общество присудило супругам Кюри одну из высших своих наград — медаль Дэви. Наконец, в том же году Шведская академия наук присудила Нобелевскую премию по физике Анри Беккерелю и супругам Кюри. Первому — «за открытие самопроизвольной радиоактивности», последним — «за их работу по исследованию явлений излучения, открытых Беккерелем». Из-за перегруженности работой и плохого состояния здоровья ни Пьер, ни Мария Кюри не могли поехать в Стокгольм и присутствовать на торжественном заседании 10 декабря 1903 г. Вместо них французский посол в Швеции принял от короля диплом и золотые медали. Эту поездку им не удалось совершить и в 1904 г.

[2] М. Кюри. Пьер Кюри. Изд. «Молодая гвардия», М., 1959, стр. 72.

Только весной 1905 г. они смогли отправиться в Швецию и прочесть в Шведской академии наук 6 июня 1905 г. свой доклад, с которым они должны были выступить при вручении им премии. Поездка в Швецию оказалась весьма приятной. Никакой пышности, мало официальных приемов, только беседы со шведскими учеными и ознакомление со страной.

Половина Нобелевской премии (около 70 000 франков по тогдашнему курсу) позволила Пьеру Кюри освободиться от преподавания в Школе промышленной физики и химии. Здесь его заменил его бывший ученик по Школе, а после один из ближайших его друзей — Поль Ланжевен.

Широкая известность стала для супругов Кюри тяжелым бременем. Недостаток средств, переутомление, несправедливость — все это они переносили без жалоб. Но теперь всякая суматоха, сопровождающая эту известность, лишила их покоя. Их мирная трудовая жизнь совершенно расстроилась. Приемы, визиты, письма, на которые надо отвечать, статьи, лекции, просьбы автографов. — все это не оставляло почти времени заняться чем-либо полезным. Вместе с этой шумной и широкой известностью пришло и признание заслуг во Франции. Вторично Пьер Кюри выдвигается кандидатом в Академию наук. На этот раз, 3 июля 1905 г., Пьер Кюри был избран, хотя его конкурент получил 22 голоса.

Ректор Университета добился для него учреждения кафедры в Сорбонне, однако при ней не была предусмотрена организация лаборатории. П. Кюри согласился принять эту новую должность только после того, как кафедра была утверждена вместе с лабораторией: две небольшие комнаты, руководитель работ, лаборант и служитель; руководителем работ была назначена Мария Кюри.

П. Кюри была предоставлена полная свобода в выборе программы. Готовя курс, он решил часть лекций посвятить учению о симметрии, теории векторных и тензорных полей и их приложениям к физике кристаллов, другую — радиоактивности. Опять много сил и времени уходило на организацию лаборатории и на подготовку нового курса, но он продолжал работать в лаборатории, которую он сохранил за собой временно на подготовительном факультете, пока не будет закончено оборудование новой. Последняя печатная работа его, выполненная вместе с А. Лабордом, была посвящена исследованию радиоактивности источников минеральных вод.

В апреле он провел несколько дней с семьей в деревне. На следующий день после возвращения из деревни 19 апреля 1906 г. он присутствовал на собрании Ассоциации профессоров факультета естествознания. Выйдя с собрания, он пешком отправился к издателю Готье-Виллару править корректуру. Переходя улицу Дофины, он попал под колеса быстро едущего тяжело груженного фургона. «Полученная им рана в голову оказалась смертельной; так были разбиты надежды, возлагавшиеся на этого удивительного человека».[3]

[3] Там же, стр. 73.

ОБЗОР НАУЧНЫХ РАБОТ П. КЮРИ

Впервые имя Пьера Кюри как автора научной статьи появилось в в 1880 г. В 90-м томе «Comptes rendues» (№ 1) [1] была напечатана совместная работа Дезена и Кюри. В ней описано измерение с помощью дифракционной решетки длины волны излучения, испускаемого медной пластинкой при 150 и 300°. Решетка представляла собой рамку с натянутой на ней металлической проволокой диаметром 0.125 мм и промежутками, также равными 0.125 мм; приемником служил термостолбик. Измерения длины волны простирались до 7 мк.

Во второй половине XIX в. многие исследователи пытались расширить исследование инфракрасной области спектра в сторону больших длин волн и получить точные значения длины волны в этой области. В 1879 г. Мутон достиг 2.14 мк. Работой Дезена и П. Кюри в следующем году этот «рекорд» был побит и граница исследованной области достигла 7 мк.

Эта работа была поставлена, по-видимому, по инициативе Дезена. В дальнейшем Кюри больше не возвращался к оптическим работам.

В том же 1880 г. почти через месяц после указанной работы в следующем томе «Comptes rendues» появляется работа братьев Кюри, содержащая описание обнаруженного ими нового явления, — получившего впоследствии название «явление пьезоэлектричества». Этим открывается целый ряд работ Кюри по изучению кристаллов, краткий обзор которых мы приводим ниже.

Работы по кристаллографии и учению о симметрии

Еще в начале XIX в. Гаюи и Беккерель заметили, что некоторые кристаллы электризуются при сжатии. На этом основании этим ученым иногда приписывалась честь открытия явления пьезоэлектричества. Однако тот факт, что Гаюи и Беккерель наблюдали такое выделение зарядов на кальците — на кристалле, который, как показали последующие исследования,

---

[1] Здесь и далее указаны номера работ, помещенных в «Библиографии трудов П. Кюри» на стр. 377.

не представляет собой пьезоэлектрического кристалла — заставляет считать, что эти ученые наблюдали электризацию, вызываемую не деформацией кристалла, а трением или вообще каким-то контактным явлением. Поэтому можно утверждать, что явление пьезоэлектричества несомненно открыто Жаком и Пьером Кюри в 1880 г.

Было ли это открытие братьев Кюри случайным, или существование явления пьезоэлектричества было ими предугадано?

Мария Кюри утверждает, что, хотя работы П. Кюри по симметрии были опубликованы значительно позднее 1880 г., но он постоянно руководствовался соображениями о симметрии, и к открытию пьезоэлектричества его привели размышления этого рода. Она говорит также, что, только предусмотрев возможность такого явления, молодые физики приступили к его разысканию. Мария Кюри предполагала опубликовать материалы, подтверждающие это утверждение, но, к сожалению, она не осуществила этого намерения.

Жак и Пьер Кюри не ограничились констатацией существования нового явления; они довольно подробно изучили его и дали ряд эмпирических правил, которым оно подчиняется.

Они установили, что в кристаллах, проявляющих пьезоэлектрические свойства, наблюдаются также пироэлектрические действия. Это обстоятельство заставило их искать связь между обоими явлениями. Из чисто качественных наблюдений они установили условия его появления, определили те классы кристаллов, в которых оно происходит, обнаружили простые соотношения между кристаллической формой и теми сторонами кристаллов, на которых появляются положительные и отрицательные заряды. Количественные измерения привели их к обнаружению законов, которые послужили исходной точкой и проверкой воздвигнутых позже теорий пьезоэлектричества. Особенно подробно ими были изучены явления в турмалине и кварце, из которых они вырезали пластинки в виде параллелепипеда, с гранями, перпендикулярными и параллельными оптической оси и так называемой электрической оси кристалла.

Если производить давление на грани, перпендикулярные оптической оси кристалла, то никакой электризации не происходит, но если сжимать пластинку в направлении электрической оси или в направлении так называемой механической или нейтральной оси, то заряды будут выделяться на сторонах пластинки, нормальных электрической оси. В первом случае имеем так называемый продольный эффект, во втором — поперечный эффект. Количество электричества, выделяющегося на гранях, пропорционально приложенному усилию. При одинаковой приложенной силе, действующей вдоль электрической оси (продольный пьезоэффект), количество выделяющегося электричества не зависит от размеров кристалла; если же усилие приложено вдоль механической оси (поперечный пьезоэффект), то количество выделяющегося электричества пропорционально площади F той грани, к которой приложено давление, и обратно пропор-

ционально площади f той грани, на которой выделяются заряды. Отсюда следует, что для того, чтобы с малой силой получить большой заряд, надо сделать площадь f возможно большой, а площадь F — возможно малой. Этот результат братья Кюри использовали для создания электроизмерительного прибора, названного ими «пьезоэлектрическим кварцем». Этот прибор описан в диссертации Жака Кюри.[2] Прибор применялся для получения зарядов заданной величины, для измерения емкостей и разности потенциалов. Он был использован Пьером и Марией Кюри в их исследованиях радиоактивности.[3]

Другой прибор «конденсатор-источник», как его назвали братья Кюри (№ 6), основан на продольном пьезоэффекте. Теория этого прибора дана Фохтом.[4]

Вскоре после сообщения братьев Кюри об открытом ими новом явлении появилась работа Г. Липпмана под названием «Принцип сохранения электричества»,[5] в которой автор, основываясь на законах термодинамики и принципе сохранения свободного электричества, рассмотрел ряд явлений электростатики, в частности явление пьезоэлектричества, и показал, что должно существовать обратное явление пьезоэлектричества, т. е. если заряжать противоположным электричеством две противостоящие грани пластинки пьезоэлектрического кристалла, вырезанные перпендикулярно электрической оси, то пластинка в этом направлении будет сжиматься или расширяться в зависимости от знаков зарядов.

Липпман не только предсказал существование такого обратного явления, но дал формулу, позволяющую вычислить его величину. Изменение толщины пластинки должно быть чрезвычайно мало. Братья Кюри к концу 1881 г. обнаружили обратный пьезоэлектрический эффект, а несколько позже провели и количественное его исследование. Они провели опыты для получения как продольного, так и поперечного обратных эффектов. Исключительная малость явления, подлежащего изучению, потребовала очень большого экспериментального искусства. Жак и Пьер Кюри успешно справились с этой трудной задачей.

Жак и Пьер Кюри заметили, что знак обратного явления может быть определен на основании обобщенного закона Ленца: если при сжатии кристалла на его концах выделяются заряды противоположного знака, то при электризации этого кристалла в том же направлении должна возникать деформация, препятствующая действию вызывающей ее причины, т. е. должно возникать расширение кристалла.

Результатом изучения братьями Кюри обратного явления пьезоэлектричества было создание еще одного измерительного прибора — «кварце-

---

[2] J. Curie, Ann. de chim. et de phys., (VI), 17, 385; 18, 203, 1889. — Перевод части этой диссертации помещен в настоящем издании на стр. 373.
[3] М. Кюри. Радиоактивность. М.—Л., 1962.
[4] W. Voigt. Lehrbuch der Kristallphysik. Leipzig, 1912, p. 804.
[5] G. Lippmann, Ann. de chim. et de phys., (VI), 24, 145, 1881.

вой бипластинки» (№ 8). Эта бипластинка служила в качестве электрометра. Теория его дана Фохтом.[6]

После работ братьев Кюри много лет не появлялось значительных работ, существенно расширивших наши знания о пьезоэлектричестве. Непосредственно после опубликования братьями Кюри их исследований были созданы феноменологические теории этих явлений. Работы Кюри были мощным толчком, побудившим заняться математическим описанием связей между электрическими, упругими и тепловыми явлениями в кристаллах, а также попытаться понять механизм этих явлений.

Феноменологическую математически разработанную теорию явлений пьезоэлектричества дал Фохт.[7] Он исходил из предположения, что во всяком элементе объема деформированного кристалла возбуждается электрический момент, представляющий собой линейную функцию компонентов деформации в рассматриваемой точке; форма этой функции учитывает свойства симметрии кристалла.

Теорию обратного явления, пользуясь методами термодинамики и указанными положениями теории Фохта, дал Поккельс.[8] Теорема Липпмана вытекает из этой теории как частный случай. Оба явления — прямое и обратное — были затем рассмотрены, исходя из представления о свободной энергии единицы объема кристалла, подверженного одновременно давлению и действию электрического поля, в виде функции компонентов деформации и компонентов силы поля. Первым этим путем пошел Дюгем.[9] Он допустил в рассуждениях ошибку, исправленную затем Поккельсом.[10]

Молекулярную теорию явлений пьезоэлектричества в то время, помимо братьев Кюри (№ 5), дал Томсон (Кельвин).[11]

Обстоятельное подробное изложение знаний о пьезоэлектричестве, полученных к первому десятилетию этого столетия, дал Фохт в своей монографии «Учебник физики кристаллов». В ней содержится также описание и разбор работ братьев Кюри.

Ценность этих теоретических работ, помимо того, что они дали для понимания явлений пьезоэлектричества, заключалась также в том, что с ними попутно в физику внедрялись величины новой природы, более сложные, чем векторы, а именно тензоры. Как раз исследования по физике кристаллов дали примеры этих величин разного порядка. Само название «тензор» было введено Фохтом. Одним из первых физиков, который понял физический смысл этих величин, был также Пьер Кюри. Хотя он не опубли-

---

[6] W. Voigt, op. cit., p. 906.
[7] W. Voigt, Gött., Abh. Ges. d. Wiss., 36, 1890.
[8] F. Pockels, Neue Jahrb. f. Miner., Beil.-Bd., 7, 224, 1890.
[9] P. Duhem, Ann. de l'Ecole Norm., (III), 9, 167, 1892; см. также: P. Duhem. Leçons sur l'électricité et magnétisme, 2, 467, 1892.
[10] P. Pockels, Neue Jahrb. f. Miner., Beil.-Bd., 8, 407, 1892.
[11] W. Thomson, Phil. Mag., (V), 36, 331, 453, 1893.

ковал законченного изложения своих соображений по этому вопросу, подобного «Lehrbuch der Kristallphysik» Фохта, хотя мы не имеем и печатных работ его, в которых было бы дано математическое изложение этого вопроса, но мы имеем ряд свидетельств, показывающих, что Пьер Кюри был одним из пионеров в освоении этой области теоретической физики. Так, Мария Кюри в предисловии к французскому изданию трудов П. Кюри сообщает, что им была подготовлена статья об общей теории пьезоэлектричества, аналогичной теории Фохта, но не была им опубликована, так как из печати вышла статья Фохта. Мария Кюри сообщает там же, что Пьер Кюри готовил книгу «о теории направленных величин и о применении их к физике кристаллов» и часть ее была уже им полностью написана. Мария Кюри предполагала опубликовать эту работу; к сожалению, это намерение она не осуществила.

Ланжевен в своей статье о П. Кюри пишет: «. . . как продолжение его идей о симметрии, он понял необходимость того, что для лучшего понимания механики, гидродинамики, теории упругости и электромагнетизма надо объединить все понятия, относившиеся к векторным полям, в единую теорию, которую он сам углубил более, чем кто-либо другой, и которая, несмотря на ее сложность, ему была полностью знакома.

«Он воспользовался первым же годом своего преподавания на своей кафедре в Сорбонне, чтобы изложить эти идеи, здесь почти неизвестные, о законах симметрии, об их плодотворном применении в физике, о теории векторов и тензоров. Он беседовал со мной о своем намерении дополнить все это более полным курсом физики кристаллических сред. Только он один мог здесь это сделать.

«Те, кто обычно разрабатывал эти вопросы, абстрактные и сложные, были физико-математиками: Гиббсы, Максвеллы, Фохты. Он же был одновременно замечательным экспериментатором».[12]

Большой интерес представляют работы П. Кюри по симметрии (№№ 10, 11, 13, 29, 30, 33).

Первые две из этих работ часто упоминают в курсах кристаллографии, когда речь заходит об истории вывода всех групп симметрии конечных систем и, в частности, вывода всех возможных видов симметрии кристаллов. К решению этой проблемы в течение XIX в. подходили с разных сторон, пользуясь разными методами, и кристаллографы, и математики. История решения этой проблемы неоднократно излагалась.[13] Напомним основные

---

[12] P. Langevin, Revue du Mois, 2, 5, 1906.

[13] См., например: И. И. Шафрановский и В. А. Франк-Каменецкий. История вывода 32 видов симметрии. В кн.: А. В. Гадолин. Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала. Изд. АН СССР, М.—Л., 1955 (Сер. «Классики науки»); см. также: И. И. Шафрановский. Евграф Степанович Федоров. Изд. АН СССР, М.—Л., 1963.

факты. Первым, кто дал полный вывод этих групп симметрии, был Гессель.[14] Однако его работа по непонятным причинам осталась совершенно незамеченной, и только в 1891г. на нее обратил внимание Зонке и восстановил справедливость, излагая заслуги Гесселя в этой области.[15] После Гесселя, ничего не зная об его работах, этим вопросом заново занялся А. Бравэ в «Мемуаре о многогранниках симметрической формы».[16] При этих исследованиях Бравэ просмотрел один возможный вид симметрии (зеркально-поворотные оси) и привел только 31 вид симметрии кристаллов. Этот пробел обнаружил сам Бравэ и указал на него в примечании ко второй своей работе.[17]

Через 18 лет А. В. Гадолин (профессор Михайловской артиллерийской академии и академик Петербургской академии наук), не зная обоих своих предшественников заново исследовал этот вопрос.[18] Гадолин нашел те же 32 подразделения, что и Гессель.

В 1883 г. Е. С. Федоров закончил свой замечательный труд «Начала учения о фигурах», который по разным причинам был опубликован только в 1885 г.[19] В этом мемуаре Федоров решил более общую задачу полного вывода совокупностей элементов симметрии для всех геометрических конечных фигур.

В своих работах 1884 г. П. Кюри решил расширить и обобщить исследование Бравэ, введя в рассмотрение зеркально-поворотную ось. Этот элемент он назвал плоскостью перемежающейся симметрии (plan de symétrie alterne) и дал новый вывод совокупности симметрии для конечных фигур. Он сперва получил 36 видов групп симметрии кристаллов, но далее он указал: «Однако рассмотрение внутреннего строения кристаллических тел, которое мы не можем здесь излагать, показало нам, что в таких телах могут существовать плоскости чередующейся симметрии только с плюсами 2-го или 3-го порядка. Четыре из вышеприведенных видов оказываются тогда невозможными, и число возможных видов подразделений внешних форм кристаллов в конце концов сводится к 32». Относительно тех же четырех случаев Гессель показал, что они исключаются в силу их несовместимости с законом рациональности.

---

[14] J. F. Chr. H e s s e l. Kristallometrie oder Kristallonomie und Kristallographie. Leipzig, 1831; оттиск из: Gehler's «Physikalische Wörterbuch», t. 5. Leipzig, 1830, p. 1662.

[15] L. S o h n c k e, Zs. f. Kristallographie, 18, 486, 1891.

[16] A. B r a v a i s, J. de math. par Liouville, 14, 1849; русск. пер. см.: Вестн. опытн. физ. и элем. матем., Одесса, 1869.

[17] A. B r a v a i s, J. de l'Éc. polyt., 34, 229, 1851.

[18] A. V. G a d o l i n, Acta soc. fenn., Helsingfors, 9, 1, 1871; см. также: А. В. Г а д о л и н. Вывод всех кристаллографических систем. . .

[19] Е. С. Ф е д о р о в. Начала учения о фигурах. Зап. СПб. минералог. общ., 2-я сер., 24, 1, 1885; см. также кн.: Е. С. Ф е д о р о в. Начала учения о фигурах. Изд. АН СССР, М.—Л., 1953. (Сер. «Классики науки»).

Все эти исследователи, различающиеся подходом к задаче и формой изложения, приходили почти к одинаковым результатам. После опубликования работ названных ученых продолжали появляться работы, посвященные той же самой проблеме. Упомянем в связи с этим Миннигероде,[20] основывавшегося на теории групп; Е. С. Федорова,[21] представившего виды симметрии с помощью алгебраических выражений, Г. В. Вульфа,[22] который пытался усовершенствовать определение симметрии и упростить проблему вывода, исходя из комбинации зеркальных плоскостей.

В своих статьях Кюри рассматривает самым общим образом систему точек, которые не обязательно представляют собой математические точки, но им можно приписать различные физические величины. Предполагается, что такая система точек у п о р я д о ч е н а, т. е. в них имеются различные части, которые представляют собой повторение одна другой. Системы классифицируются по их п о в т о р я е м о с т и, т. е. рассматриваются системы, допускающие совмещения их самих с собой путем трансляций и поворотов.

Такие же системы рассматриваются затем с другой точки зрения. Помимо заданной системы рассматривается вторая система, получающаяся из первой путем симметричных преобразований, которые можно осуществить, взяв изображение первой системы по отношению к некоторой плоскости и повернув затем это изображение на некоторый угол вокруг нормали к этой плоскости. Когда некоторая система тождественна со своей симметричной системой, Кюри говорит, что она симметрична самой себе.

Кюри ввел ряд определений и доказал ряд теорем. Он изучил «индифферентные преобразования», осуществляющие преобразования симметрии и повторяемости, и показал, что, помимо обычных плоскостей симметрии, необходимо ввести понятие о плоскости перемежающейся симметрии, характеризующее операцию второго рода. Тогда, как показал Кюри, можно дать полную классификацию всех видов симметрии рассматриваемых систем. Приписав точкам системы физические свойства, в частности векторные физические свойства, Кюри пришел к рассмотрению с точки зрения симметрии различных физических явлений самих по себе и их взаимоотношения с симметрией среды, в которой эти свойства проявляются. Он, в частности, исследовал с этой точки зрения свойства некристаллических сред, в которых имеется электрическое или магнитное поле, и рассмотрел следствия, отсюда проистекающие.

---

[20] H. M i n n i g e r o d e, Neue Jahrb. f. Miner., Beil.-Bd., 5, 145, 1887.

[21] Е. С. Ф е д о р о в. Симметрия конечных фигур. Зап. СПб. минералог. общ., 2-я сер., 25, 1—52, 1889.

[22] Ю. В. В у л ь ф. Симметрия и вывод всех ее кристаллографических видов. Варш. унив. изв., 7, 1—30, 1897; см. также: Г. В. В у л ь ф. Избранные работы по кристаллографии и кристаллофизике. М.—Л., 1952, стр. 166—191.

В его работе (№ 33) о симметрии в физических явлениях сформулированы общие принципы симметрии(см. их формулировку на стр. 102 настоящего издания), которые служили ему руководящим началом задолго до опубликования этой работы. Ланжевен писал: «Подобно обоим принципам термодинамики, принцип симметрии ограничивает область возможных явлений, налагая необходимые условия, позволяющие утверждать невозможность этих явлений. Принцип симметрии утверждает невозможность увидеть данное физическое явление в среде, если в последней не существует некоторой определенной минимальной диссимметрии, характерной для этого явления, диссимметрии, которой не может быть в этом явлении, если она не предсуществовала ему в его причине, в состоянии среды. Это положение представляет собой новую и плодотворную форму принципа причинности, которую ввел Кюри и впервые использовал в своих исследованиях по пьезоэлектричеству и которая привела его к изложению симметрии или характеристической диссимметрии различных явлений».[23]

Для возникновения явления необходимо, чтобы некоторые элементы симметрии отсутствовали, т. е. чтобы существовала некоторая диссимметрия, которая и порождает явление (см. стр. 101). Наличие диссимметрии есть необходимое условие существования данного явления, но, как отмечает Кюри, оно не есть условие достаточное.

Поле всякой физической величины, представляет ли она собой скаляр, вектор или тензор, обладает в каждой точке известной симметрией. Группа симметрии поля — это группа тех преобразований координат, которые оставляют неизменными значения компонент этих физических величин, соответствующих каждой точке поля. Группа симметрии однородного векторного поля содержит группу вращения около направления вектора поля; для полярного вектора (каковым является вектор напряженности электрического поля) эту группу надо дополнить плоскостью симметрии, проложенной в направлении вектора, для аксиального вектора (вектор напряженности магнитного поля) — плоскостью симметрии, перпендикулярной полю.

Всякое физическое явление можно представить себе как взаимодействие полей нескольких физических величин. Тогда группа симметрии этого физического явления будет общей подгруппой групп симметрии всех полей, участвующих в этом взаимодействии.[24]

Рассматривая явление, разыгрывающееся в некотором веществе, структура которого также обладает некоторой симметрией, надо принять во внимание и эту последнюю. П. Кюри утверждает, что все виды симметрии этого вещества обнаруживаются в симметрии разыгрывающегося в этом веществе явления. Другими словами, группа симметрии вещества есть общая подгруппа симметрии всех проявляющихся в этом веществе взаимо-

---

[23] P. L a n g e v i n, Revue du Mois, 2, 30, 1906.

[24] См.: M. A b r a h a m, Enc. d. math. Wiss., IV_3, 1, Leipzig, 1900.

действий. Это представляет собой обобщение известного положения Неймана, которое в формулировке, данной ему Миннигероде, гласит: «Группа симметрии кристалла есть подгруппа симметрии всех возможных в этом кристалле физических явлений».[25]

Эти положения позволяют предсказать, в каких видах кристаллов может проявиться взаимодействие полей тех или иных физических величин, геометрическая природа которых известна. Так Пьер Кюри мог предсказать, что электрическая поляризация кристаллов (имеющая симметрию полярного вектора) при равномерном нагревании (симметрия скаляра) или при одностороннем сжатии может проявиться только в кристаллах, не имеющих центра симметрии.

В работе «О возможности существования магнитной проводимости и свободного магнетизма» (№ 34) Пьер Кюри рассматривает вопрос о такой возможности с точки зрения принципа симметрии. Рассматривая группу симметрии, которая соответствует изолированному шару, заряженному свободным магнетизмом (северным или южным), и группу симметрии того же шара, помещенного в магнитное поле, Кюри приходит к заключению, что с точки зрения принципа симметрии нет ничего абсурдного ни в понятии магнитного тока, ни в понятии свободного магнетизма. Однако ввиду недостаточности условия отсюда еще вовсе не следует, что такие явления должны существовать в действительности.

В настоящее время тензорное и матричное исчисления дают аналитические средства представления симметрии физических явлений и сред, позволяющие почти автоматически воспроизводить результаты Кюри и Фохта.

Говоря о фундаментальном значении понятия симметрии физических явлений, П. Кюри указывал на некоторую аналогию этого понятия и понятия о размерности физических величин; он писал: «Связь подобного рода существует и между двумя величинами, имеющими одну и ту же размерность. . . Точно также при составлении уравнения, описывающего какое-нибудь физическое явление, связь между причиной и действием выражается согласованием между величинами, входящими в обе части уравнения, и эти обе части должны быть одинаковой размерности».

Мы теперь говорим, что всякое равенство имеет смысл только тогда, когда обе его части имеют одну и ту же тензорную природу.

Принцип симметрии П. Кюри представляет собой одно из основных положений феноменологических теорий физических явлений. В последние годы, в связи с развитием нового направления термодинамики — термодинамики необратимых процессов — и необходимости правильной формулировки законов этого направления физической кинетики, вновь оживился интерес к принципу симметрии П. Кюри.[26]

---

[25] B. Minnigerode, Göttin. Nachr., 195, 1884.

[26] См., например: С. де Гроот, П. Мазур. Неравновесная термодинамика. Изд. «Мир», М., 1964.

Обстоятельный и интересный обзор работ Пьера Кюри по симметрии написал акад. А. В. Шубников.[27]

Выше было указано, что работы братьев Кюри по пьезоэлектричеству дали толчок для построения феноменологической теории пьезоэлектричества. Дальнейшее экспериментальное исследование и практическое использование нового явления долгое время после работ братьев Кюри не было сколько-нибудь интенсивным. У. Кэди в своей обширной монографии по пьезоэлектричеству пишет: «В течение трети века после его открытия пьезоэлектричество оставалось научным курьезом, не упоминалось в большинстве учебников и служило темой немногих докторских диссертаций».[28]

В этот период имели место случаи практического использования явлений пьезоэлектричества: упомянем, в частности, применение Б. Б. Голицыным в 1915 г. пьезокварца для регистрации ускорения в сейсмическом маятнике.

Толчком к интенсивному изучению пьезоэлектричества послужила идея Поля Ланжевена электрическим путем возбуждать колебания кварцевых пластинок и использовать их и в качестве излучателей, и в качестве приемников высокочастотных звуковых волн. Стимулом к возникновению этой мысли у Ланжевена послужила первая мировая война. С помощью отражения высокочастотных звуковых волн в воде Ланжевену удалось осуществить обнаружение предметов (в частности, вражеских подводных лодок), погруженных в воду, а также измерять глубину дна океана. Так возникла новая отрасль физики — ультраакустика.[29]

То обстоятельство, что именно Ланжевену пришла идея воспользоваться для этих целей пьезоэлектричеством, не случайна. Ведь он был учеником Пьера Кюри в Школе промышленной физики и химии, заменил Пьера Кюри в этой Школе на кафедре физики, был одним из ближайших друзей Пьера Кюри. Знакомство с явлениями пьезоэлектричества и понимание их он получил из рук самого первооткрывателя этого явления.

С 1917 г. началось широкое внедрение явления пьезоэлектричества в радиотехнику, для создания стабилизаторов, фильтров и пр., в электроакустику, в измерительную технику и т. д. Литература по этим вопросам стала поистине необозримо широка.

---

[27] А. В. Шубников. О работах Пьера Кюри в области симметрии. Усп. физ. наук, 49, вып. 7, 591, 1956.

Современное состояние учения о симметрии с библиографией вопроса см.: А. В. Шубников. Симметрия и антисимметрия конечных фигур. Изд. АН СССР, М., 1951.

[28] W. Cady. Piezoelectricity. An Introduction to the Theory and Application of Electromechanical Phenomena in Cristals, N. Y., 1946; русск. пер. У. Кэди. Пьезоэлектричество и его практические применения. ИЛ, М., 1949, стр. 20.

[29] О работах П. Ланжевена по использованию пьезоэлектричества см.: О. А. Старосельская-Никитина. Работы Поля Ланжевена в области пьезоэлектричества и ультразвука. Тр. Инст. истории естеств. и техн. АН СССР, 19, 170—196, 1956.

В 1885 г. появилась небольшая статья Пьера Кюри, посвященная вопросу об образовании кристаллов и о роли капиллярных сил в этом образовании. Эта работа была одной из первых попыток ответить на вопрос: как может получиться то ограничение внешней формы кристаллов, замечательная закономерность которой так бросается нам в глаза? В чем причина того, что для этого ограничения служат только определенные плоскости? Как понять то обстоятельство, что внешние условия могут влиять на выбор этих ограничивающих граней?

Пьер Кюри не знал, что почти за десять лет до опубликования им этой статьи Гиббс в своем большом мемуаре «О равновесии гетерогенных веществ» (1875—1877) рассмотрел эту задачу и высказал такое же основное положение, что и Кюри.[30] Принцип Кюри—Гиббса утверждает, что в насыщенном растворе кристалл находится в равновесном состоянии тогда, когда его форме соответствует наименьшее значение поверхностной энергии кристалла при заданном его объеме. Различно ориентированным граням кристалла присущи разные значения капиллярной постоянной A_1, A_2,. . . Если площади этих граней равны S_1, S_2. . ., то полная (свободная) поверхностная энергия кристалла равна $\Sigma A_i S_i$. Равновесная форма кристалла определяется условием $\Sigma A_i S_i = \min$. при $V = \mathrm{const.}$, где V — объем кристалла. Гиббс вывел это положение, развивая термодинамическую теорию капиллярности. Кюри исходил из теории капиллярности Гаусса, созданной последним для жидкостей. У Кюри этот принцип представлял собой обобщение положения Гаусса о равновесной сферической форме капли как форме с наименьшей поверхностной энергией.

Ни одна работа Пьера Кюри не вызывала столько споров и возражений. С разных точек зрения возражали против этого принципа Берту, Фридель, Валетон.[31] Последний провел особенно обстоятельное исследование.

Одно из главных возражений касалось того, что принцип Гаусса вообще не может быть применен к кристаллам. Теория капиллярности Лапласа и Гаусса рассматривает механическое равновесие некоторого количества жидкости. Гаусс исходил из принципа виртуальной работы. Но в кристалле отдельные части не могут свободно смещаться друг относительно друга, и работа поверхностных сил здесь пренебрежимо мала. Задача не может решаться только методами теории капиллярности. Для рассмотрения этого гетерогенного равновесия между кристаллом и раствором требуется привлечение обоих принципов термодинамики.

В теории Гиббса это и было сделано. Из теории Гиббса получается, что роль капиллярных постоянных при увеличении величины кристалла

[30] J. W. Gibbs, Connecticut Trans., 3, 108—248, 343—524, 1875—1877; см.: Дж. В. Гиббс. Термодинамические работы. Гостехиздат, М.—Л., 1950.

[31] A. Berthoud, J. de chim. phys., 10, 624, 1912; G. Friedel, J. de chim. phys., 11, 478, 1913; см. также: G. Friedel. Leçons de cristallographie. Paris, 1926; J. J. P. Valeton, Ber. Sächs. Geselsch. d. Wiss. zu Leipzig, 67, 1—59, 1915.

уменьшается и даже у кристаллов еще сравнительно малых размеров эта роль уже становится ничтожно малой.

Другое возражение сводилось к замечанию, что в действительности мы имеем кристаллы, внешняя форма которых передает не форму равновесного состояния кристалла, а есть результат условий роста кристалла, т. е. результат некоторого неравновесного процесса.

Г. В. Вульф вывел из минимального принципа Кюри—Гиббса весьма изящную теорему, из которой можно получить простое геометрическое построение внешней равновесной формы кристалла.[32] Доказательство теоремы и построения Вульфа многими авторами уточнялись и улучшались.

Начиная с 20-х годов нашего столетия интерес к проблеме роста кристаллов значительно возрос. Обнаружилась вся сложность явлений роста и растворимости кристаллов. До последнего времени появляются работы pro et contra принципа Кюри—Гиббса. Но в основном в этом вопросе интерес переместился из термодинамически-феноменологического рассмотрения этих явлений к молекулярно-кинетическому подходу. Основоположники этого нового направления — Коссель и Странский. По словам Косселя, принцип Кюри—Гиббса рассматривает проблему образования кристаллов «zu summarisch». По вопросу о росте кристаллов за последние годы появилась большая литература. Нет недостатка и в обзорной литературе. Одним из обзоров является книга Бакли, в которой есть целая глава, посвященная теории Кюри и ее последующей судьбе.[33]

Можно с уверенностью сказать, что работа П. Кюри об образовании кристаллов вызвала интерес и внимание к этим вопросам, и в этом ее большое значение.

Обзор работ Пьера Кюри по кристаллографии и кристаллофизике дан И. И. Шафрановским.[34]

Работы по магнитным свойствам вещества

Знакомясь с обстоятельствами появления кристаллографических работ Пьера Кюри, так же как его работ по радиоактивности, мы можем указать на те причины, которые его побудили заняться этими вопросами. В отношении же работ его по изучению магнитных свойств вещества нельзя с уверенностью сказать, каковы были те основания, которые привели

---

[32] G. Wulf, Zs. f. Kristallogr., 34, 449—530, 1901; см. также: Г. В. Вульф. Избранные работы по кристаллографии и кристаллофизике. М. — Л., 1952.

[33] H. E. Buckley. Crystal Growth. N. Y. — London, 1951; русск. пер.: Г. Бакли. Рост кристаллов. ИЛ, М., 1954.

[34] И. И. Шафрановский. Пьер Кюри — кристаллограф. Тр. Инст. истории естеств. и техн. АН СССР, 19, 84—94, 1956.

его к этим исследованиям. По этому поводу можно делать только некоторые предположения.[35]

Пьер Кюри приступил к изучению магнитных свойств в 1891 г. Начиная с конца 1892 г. он начал публиковать результаты отдельных этапов этой работы. С 1892 по 1894 г. в «Comptes rendues» было напечатано 5 статей (№№ 25, 27, 28, 31 и 32). В 1895 г. он опубликовал две объединяющие статьи (№№ 35 и 36), одну подробную (№ 35), перевод которой и помещен в настоящем издании, и другую сокращенную (№ 36). Эта работа была Пьером Кюри представлена в качестве диссертационной и защищена им на факультете естествознания Парижского университета. Вот как Мария Кюри описывает эту защиту:

«Жюри состояло из профессоров Бути, Липпмана и Отфейля. Среди присутствующих были друзья Пьера Кюри и его старый отец, счастливый успехом сына. Я помню простоту и ясность изложения, уважение, с которым относились профессора, и беседу, завязавшуюся между ними и Пьером Кюри, напоминавшую заседание Физического общества».[36]

Работа Кюри по магнитным свойствам тел являет нам образец во всех отношениях прекрасно выполненного экспериментального исследования: и по умело выбранной теме, и по хорошо поставленной перед собой задаче, и по изумительному экспериментальному мастерству, проявленному при его выполнении, и по богатству и значительности полученных результатов, оказавших большое влияние на последующее развитие науки о магнетизме. Можно утверждать, что это исследование стало опытным фундаментом последовавших затем теоретических работ по магнетизму.

Кюри поставил задачу узнать, представляют ли собой диа-, пара- и ферромагнетизм совершенно разные по своей природе свойства тел, или имеются какие-то переходные между ними состояния? Не есть ли это различные формы какого-то одного единого свойства, которые могут переходить одна в другую при изменении условий? Чтобы решить этот последний вопрос, надо, по мнению Кюри, исследовать магнитные свойства веществ при самых разных условиях давления, температур и силы внешнего намагничивающего поля.

Некоторые опыты в этом направлении были проведены до Кюри. Прекрасный обзор этих работ дал сам Кюри в вводной части своей статьи. Однако эти опыты не давали достаточного материала для того, чтобы сделать какие-нибудь обобщающие выводы. Так, например, Видеман и Плесснер обнаружили обратную пропорциональность между магнитной восприимчивостью и абсолютной температурой парамагнитных солей. Плюккер нашел температурную независимость восприимчивости серы и ртути и уменьшение ее с температурой у висмута. Роулэнд, Гопкинсон и другие нашли исчезновение ферромагнетизма у железа выше 770° и у никеля

[35] См., например: Я. Г. Дорфман. Вклад Пьера Кюри в науку о магнетизме. Тр. Инст. истории естеств. и техн. АН СССР, 19, 70—83, 1956.

[36] М. Кюри. Пьер Кюри. М., 1959 (Сер. «Жизнь замечательных людей»), стр. 31.

выше 340°. Но все это были разрозненные результаты, полученные в небольших пределах изменения температуры. Кюри же провел свои исследования, меняя температуру от 25 до 1370° и напряженность магнитного поля от 25 до 1350 эрстед.

Кюри оценивал точность своих относительных измерений магнитной восприимчивости в 1—2%. В качестве вещества сравнения была взята вода, восприимчивость которой согласно его абсолютным измерениям была принята равной $-0.79 \cdot 10^{-6}$ с ошибкой около 3%. Более новые измерения дают для воды значение $-0.72 \cdot 10^{-6}$, поэтому, чтобы сравнить результаты, полученные Пьером Кюри для магнитной восприимчивости разных веществ, с результатами новейших измерений, надо первые умножить на множитель $\frac{0.72}{0.79}=0.91$. При всех измерениях вводилась поправка на магнетизм воздуха. Влияние незначительных примесей железа могло быть обнаружено по гистерезису, присущему последнему.

Основные результаты, к которым пришел Кюри в этом своем исследовании, представляют собой совершенно определенные ответы на поставленный им себе вопрос, а именно: физическая природа диамагнетизма и парамагнетизма совершенно различны. Ферромагнетизм же связан с парамагнетизмом, обе эти формы проявляют себя в разных областях температуры, разделенных между собой температурой «магнитного превращения», как назвал ее Кюри, или «точкой Кюри», как говорим теперь мы.

При повышении температуры восприимчивость парамагнитных тел изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре. Магнитная восприимчивость же диамагнитных тел, вообще говоря, не зависит от температуры и от напряженности поля. Мы теперь знаем некоторые исключения из этого последнего правила Кюри: вспомним явление Фан-Альфена—Де Хааза для диамагнитных металлов при низких температурах. Кюри отмечает исключительно интересное поведение висмута и сурьмы, первый из которых весьма своеобразен и по своим электрическим свойствам.

Изучение ферромагнитных тел, и в особенности железа, при высоких температурах позволило внести некоторую ясность в те переходы железа из одной модификации в другую, которые в те годы и позже так интересовали металловедов.

Кюри обратил внимание на известную аналогию между характером изменения магнитной восприимчивости в зависимости от силы намагничивающего поля и от температуры и изменением плотности жидкостей и газов в зависимости от давления и температуры. Аналогия эта проявляется и между явлениями перехода из парамагнитного состояния в ферромагнитное и явлением сжижения газов. Эта аналогия была затем использована Вейссом при создании им его теории ферромагнетизма.

Различие диамагнитных действий, с одной стороны, и пара- и ферромагнитных, — с другой, столь отчетливо выявленное исследованием

Кюри, имело фундаментальное значение в выработке наших представлений о внутренней природе магнитных явлений. После работы Кюри появились теоретические работы Ланжевена [37] о диамагнетизме и парамагнетизме и затем большой ряд работ Пьера Вейсса по ферромагнитным веществам. И те, и другие непосредственно вытекали из работ Кюри.

Через 8 лет после завершения своего большого исследования магнитных свойств вещества при разных температурах появилась еще одна работа Пьера Кюри, опубликованная им совместно с Ш. Шенево (№ 63). В этой работе описан новый метод измерения магнитной восприимчивости. Этот метод — метод Кюри—Шенево — до сих пор применяется, в особенности в тех случаях, когда нужно провести измерения с веществом, имеющимся в очень малом количестве. Пользуясь этим методом, Кюри и Шенево измерили магнитную восприимчивость хлористого радия.

Заканчивая обзор работ П. Кюри по магнетизму, приведем заключительные слова обзорной статьи Я. Г. Дорфмана:

«Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что во многих случаях и диамагнитные, и парамагнитные тела обнаруживают более сложные зависимости, чем те, которые были открыты Кюри. Дальнейшие и теоретические и экспериментальные исследования внесли серьезные изменения в классические представления, на которые опиралась теория того времени, но крупный вклад, внесенный Пьером Кюри в учение о магнетизме, остается в золотом фонде современной науки. И хотя давно миновали те времена, когда можно было такими скромными техническими средствами осуществлять крупные экспериментальные исследования, тем не менее описанные здесь работы Пьера Кюри по магнитным свойствам вещества останутся навсегда одним из наиболее блестящих достижений экспериментальной физики, ярким поучительным примером для многих поколений ученых». [38]

Работы по радиоактивности

В конце 1897 г. Мария Кюри собиралась приступить к подготовке докторской диссертации и задумалась над выбором темы. После обсуждения этого вопроса вместе с П. Кюри они остановились на «лучах Беккереля», как тогда первоначально называли радиоактивные излучения, открытые в 1896 г. Анри Беккерелем почти случайно при работе с солями урана.

Мария Кюри прежде всего занялась вопросом, существуют ли, помимо урана, также и другие элементы, обладающие свойством давать излучение, подобное тому, которое было открыто Беккерелем. Исследовав ряд элементов, Мария Кюри и независимо от нее Г. Шмидт [39] нашли, что, как и

---

[37] Русский перевод работ П. Ланжевена см. в книге: П. Ланжевен. Избранные труды. Изд. АН СССР, М., 1960 (Сер. «Классики науки»).

[38] Я. Г. Дорфман, ук. соч., стр. 83.

[39] G. C. Schmidt, Ann. der Phys., 65, 141, 1898.

уран, источником подобных излучений является также торий и его соединения.

Те качественные методы (почернение фотографических пластинок, фосфоресценция), которыми пользовался Беккерель, М. Кюри заменила количественными, определяя интенсивность этого излучения путем измерения степени ионизации воздуха в ионизационной камере. Измерительными приборами, которыми она пользовалась, были электрометр Кюри, соединенный с пьезоэлектрическим кварцем Жака и Пьера Кюри. Эти количественные измерения показали, что интенсивность излучения пропорциональна количеству урана, содержащегося в исследуемых образцах, и не зависит от рода химического соединения, в которое входит уран, и от внешних воздействий. Отсюда она заключила, что излучение урана, а также тория, есть их атомное свойство. Для изучаемого класса явлений Марией Кюри было предложено название «радиоактивность».

Изучая ряд минералов, М. Кюри обнаружила, что некоторые из них значительно активнее, чем можно было ожидать, судя по содержанию в них урана или тория. Мария Кюри предположила, что эти минералы содержат в небольших количествах какое-то вещество, более активное, чем уран или торий.

Пьер Кюри заинтересовался этим вопросом настолько, что решил оставить незаконченной свою работу, которой он в то время занимался (исследованием скорости роста и растворения разных граней кристаллов), и присоединиться к Марии Кюри для проверки этой гипотезы.

Пьер Кюри предполагал, что он только на непродолжительное время оставляет свои кристаллы, но оказалось, что он почти целиком ушел в исследование радиоактивности в последние годы жизни.

Мы не будем здесь излагать историю первых лет развития учения о радиоактивности, в котором доля участия супругов Кюри была исключительно велика. Эта сделал сам Пьер Кюри в двух обзорных статьях, перевод которых на русский язык помещен в настоящем издании.

Одна из них, это доклад Пьера и Марии Кюри на Международном физическом конгрессе, состоявшемся в 1900 г. в Париже (№ 48). Вторая — обзорная статья 1903 г. «Последние исследования радиоактивности» (№ 65).

Мы поэтому ограничимся тем, что перечислим главнейшие результаты работ самого Пьера Кюри с сотрудниками в этой области. Затем мы приведем краткое содержание статей Пьера Кюри, посвященных радиоактивности и помещенных в настоящем издании. Это целесообразно сделать, потому что из заглавия той или иной статьи не всегда можно заключить, что именно заключает данная статья.

Подробности того, как проходили первые два с половиной года совместной работы Марии и Пьера Кюри, посвященные проверке их предположения о существовании элементов, более активных, чем уран и торий, можно узнать из их лабораторных записных книжек за время с января 1898

по август 1900 г., опубликованных их дочерью Ирен Жолио-Кюри во 2-м французском издании (1955 г.) биографии Пьера Кюри, написанном Марией Кюри.[40]

Попытка определить неизвестное активное вещество из урановой руды завершается открытием двух новых элементов. В июле 1898 г. они опубликовали краткое сообщение об открытии полония (№ 37), а в декабре того же года — второе сообщение об открытии радия (№ 38).

Эти два открытия произвели громадное впечатление в научном мире. Сам факт открытия нового элемента всегда представляет событие большого значения. В данном же случае были открыты новые элементы с совершенно поразительными свойствами. До тех пор радиоактивные свойства были обнаружены у урана и тория, двух элементов уже известных в химии. В работах супругов Кюри открыты новые элементы с радиоактивными свойствами, из которых один — радий — в чистом виде в несколько миллионов раз более активен, чем уран.

Это открытие могло быть сделано Пьером и Марией Кюри только потому, что оба открытых элемента обладали свойством радиоактивности. Эта их активность была единственным признаком, которым руководствовались М. и П. Кюри при отделении обогащенных продуктов переработки урановой руды. Открытие этих элементов напоминает открытие редких элементов с помощью спектрального анализа. Четой Кюри был открыт новый метод химического анализа вещества, основанный на исследовании радиоактивности. Аналогично тому, как открытие спектрального анализа привело к открытию двух новых элементов — рубидию и цезию, так и открытие радиоактивности привело к открытию полония и радия. Применение этого метода Дебьерном привело через год к открытию еще одного радиоактивного элемента — актиния.[41]

Другим достижением Пьера Кюри была та доля, которая принадлежит ему в открытии β-лучей и изучении их природы.

В 1899 г. Гизель [42] заметил, что светящееся пятно на флуоресцирующем экране, возбуждаемое узким пучком лучей, испускаемых радием, и направленным между полюсами электромагнита, при включении тока расширяется в одном направлении. При изменении направления поля на противоположное это расширение флуоресцирующего пятна происходит в противоположную сторону. Величина и направление смещения соответствовали тому, что можно получить с пучком катодных лучей. Пьер Кюри нашел, что излучение радия состоит из двух составляющих, из которых одна, по-видимому, неотклоняема магнитным полем и легко поглощается (то, что позже Резерфордом было названо α-лучами) и другая — прони-

[40] Французский текст и русский перевод см.: И. Жолио-Кюри. Лабораторные записные книжки периода открытия полония и радия. Тр. Инст. истории естеств. и техн. АН СССР, 19, 97—135, 1956.

[41] A. Debierne, C. r., **129**, 593, 1899; **130**, 206, 1900.

[42] F. Giesel, Ann. der Phys., **69**, 834, 1899.

кающая и отклоняемая магнитным полем (β-лучи). П. Кюри заметил также, что β-лучи обладают более слабой ионизационной способностью по сравнению с α-лучами. В совместной работе Марии и Пьера Кюри (№ 42) впервые было с достоверностью показано, что β-лучи радия несут с собой отрицательный заряд.

Изучая различные действия, которые производят лучи радиоактивных веществ М. и П. Кюри обнаружили, что они способны производить химические действия в целом ряде веществ. Причем влияние α-лучей значительно более заметное, чем влияние β- или γ-лучей. Одним из интересных проявлений влияния этих лучей является окрашивание стекол. Это действие проявляют все три рода радиоактивных лучей, но, однако, с разной интенсивностью. Первое наблюдение этого рода принадлежит Марии и Пьеру Кюри (№ 40). Аналогичное окрашивание под влиянием излучения радия они наблюдали также на кристаллах хлористого бария. Они наблюдали также превращение кислорода в озон (№ 40).

Пьер Кюри (№ 56) сделал интересное наблюдение, что лучи радия, так же как рентгеновские лучи, сообщают жидким диэлектрикам проводимость, подобно тому, как они сообщают таковую газам.

Одно из самых замечательных открытий Пьера Кюри, которое можно поставить по значению в один ряд с открытием радия и полония, — это измерение им вместе со своим сотрудником Лабордом (№ 61) теплоты, выделяемой солями радия. Еще и раньше было ясно, что радиоактивные тела посылают в окружающее пространство значительное количество энергии в виде характерного для них излучения. До этой работы производились подсчеты значения этой энергии, исходя из значений кинетической энергии α- и β-частиц, испускаемых радиоактивными веществами. Кюри и Лаборд произвели экспериментально первое надежное измерение этой энергии. Они заметили, что соединения радия всегда имеют температуру, которая несколько выше температур окружающих тел и атмосферы. Для измерения количества тепла, выделяемого радием за определенный промежуток времени, они провели два эксперимента. В одном опыте они воспользовались ледяным калориметром Бунзена; в другом опыте они измерили с помощью термоэлемента разность температур в двух ампулах: одной, содержащей хлористый барий с радием, а другой — чистый хлористый барий. Они нашли, что 1 г радия излучает за 1 час 100 кал. тепла; за 1 год 1 г радия выделяет 876 000 кал.

Свойство радия создавать столь большие количества тепла, оставаясь длительное время почти неизменяющимся, привлекло большое внимание к этому вопросу. Последовало много работ других исследователей с целью проверки, подтверждения и уточнения результатов Кюри и Лаборда. Оказалось, что числа, полученные последними, близки к тем, которые были получены позже более надежными методами. Точные измерения дали для полного теплового эффекта радия при поглощении всего его излучения 140.1 кал. в час на 1 г радия, из них 124.4 кал. приходится на α-ча-

стицы и на отдачу атомов радия при испускании α-частиц, 6.3 кал. на β-частицы и 9.4 — на γ-лучи (здесь β- и γ-лучи испускаются радием B и радием C).

Эти тепловые эффекты, совершенно несравнимые с тепловыми эффектами обычных химических реакций (например, 1 г радона за свою жизнь выделяет $2.3 \cdot 10^9$ кал., а 1 г угля при сжигании дает $8 \cdot 10^3$ кал.), показали, какие громадные запасы энергии заключены в ядрах атомов и могут быть освобождены при их перестройке, сопровождаемой радиоактивным излучением. Эта работа Кюри и Лаборда была первой работой в новой области знаний, которая привела к развивающейся в наши дни ядерной энергетике.

Сам П. Кюри совместно с Дж. Дьюаром в следующем году исследовали еще раз тепловой эффект, создаваемый радием. Они показали, что эта отдача тепла остается неизменной и при низких температурах: при температуре жидкого кислорода (—180°) и при температуре жидкого водорода (—252°).

Наибольшее число работ Пьера Кюри посвящено изучению одного явления, открытого им вместе с Марией Кюри еще в первые годы их общей работы по радиоактивности и названного им «наведенной, или индуцированной, радиоактивностью». Первая статья, в которой М. и П. Кюри сообщают об открытом явлении, относится к ноябрю 1899 г. (№ 39). Затем почти каждый год П. Кюри публикует статьи по этому вопросу, сперва с Дебьерном, затем либо один, либо с Данном.

Явление наведенной радиоактивности, наблюденное Марией и Пьером Кюри у радия, было затем наблюдено Резерфордом у тория[43] и Дебьерном у актиния. Оно состоит в том, что радий, торий и актиний обладают способностью при известных условиях сообщать всем телам, находящимся в близком соседстве с ними, временную активность. Эта активность теряется через некоторое время по удалении этих тел от соседства с радием. Для объяснения явлений наведенной радиоактивности, вызываемой соединениями тория, Резерфорд допустил существование радиоактивного газа, который он назвал эманацией; эта эманация может ионизовать воздух, действует на фотографическую пластинку. Теперь мы знаем, что это явление не представляет собой сообщение носителям этой активности каких-то особых свойств и не сопровождается какими-либо внутренними изменениями активируемых тел, индуцированными присутствующими поблизости радиоактивными веществами. Нам теперь известно, что здесь происходит просто осаждение активных веществ, продуктов распада эманаций «материнского вещества». Поэтому теперь термин «наведенная радиоактивность» заменен названием «активные осадки». Постоянство или непостоянство активации не имеет ничего общего с природой тех носителей, на которые

---

[43] E. Rutherford, Phil. Mag., **49**, 1, 161, 1900.

происходит такое осаждение, а зависит только от свойств продуктов распада исходного вещества.

В работе (№ 49), проведенной вместе с Дебьерном, П. Кюри показал, что наведенная радиоактивность передается от излучающего вещества к активируемым телам не непосредственно с помощью излучения, а через воздух, и может передаваться даже через тонкие капиллярные трубки. В этой работе высказывается мнение, что Резерфордова гипотеза об эманации может объяснить некоторые из наблюдаемых явлений, но Кюри считает еще преждевременным строить какую-нибудь теорию и полагает, что необходимы еще новые опытные факты.

В следующей работе (№ 50) Кюри и Дебьерн, продолжая накапливать эти новые факты, исследуют дальше роль промежуточных газов в передаче наведенной радиоактивности; они определяют влияние природы и давления этих газов и устанавливают, что передача наведенной радиоактивности прекращается при откачке сосуда.

В работе № 52 они сообщают об активации воды при растворении в ней радиоактивной соли и последующей дистилляции. В этой статье Кюри и Дебьерн высказывают некоторые теоретические соображения, с помощью которых они стремятся согласовать наблюдаемые явления. Они предполагают, что каждый атом радия есть источник некоторой радиоактивной энергии, которая аккумулируется в атоме и рассеивается путем излучения или путем проводимости; этот второй путь и создает явление наведенной радиоактивности. В атоме существует равновесие между аккумулируемой и рассеиваемой энергией, подобно тому, как это имеет место в тепловых явлениях, когда тепловое равновесие в теле наступает при равенстве потерь тепла через излучение и теплопроводность, с одной стороны, и поступлении тепла — с другой.

В работе № 53 описаны опыты по свечению некоторых люминесцирующих веществ, помещенных в активационный сосуд.

Во всех предыдущих работах, занимаясь исследованием наведенной радиоактивности, П. Кюри изучал условия, при которых она возникает. Начиная с работы № 57 он исследует процессы спадания активности — «дезактивации» — активированных тел. В работе № 57 устанавливается экспоненциальный закон дезактивации сосуда, активированного радием, причем отмечается, что постоянная времени (величина, обратная постоянной распада) в этом законе сохраняет одно и то же значение при совершенно разных условиях и не зависит ни от природы газа, заполняющего сосуд, ни от материала стенок сосуда. Это наблюдение Пьера Кюри не поколеблено до сих пор; до настоящего времени не обнаружено случаев, в которых постоянная времени изменилась бы при изменении этих условий. Эту неизменность постоянной времени П. Кюри предлагал даже использовать в качестве эталона времени (№ 58).

В следующей работе (№ 59) Пьер Кюри установил неизменность постоянной времени при изменении температуры сосуда, в котором наблюдается дезактивизация воздуха. Кюри изменял температуру от —180 до +450°.

В этой работе П. Кюри вновь возвращается к толкованию свойств эманации, предложенной Резерфордом для объяснения явлений наведенной радиоактивности. Кюри здесь все еще не склонен считать, что эманация представляет собой некоторое вещество. Он полагает, что эманация состоит из каких-то центров конденсации радиоактивной энергии, и что эти центры могут захватываться газовыми молекулами и таким образом перемещаться вместе с последними. Резерфорд уже тогда считал, что эманация представляет собой газ, принадлежащий к группе аргона. Кюри же в то время считал, что для такого представления нет достаточных оснований. Хотя Кюри в своих статьях в это время постоянно пользовался термином «эманация», но он сам говорил, что, по его мнению, эманация «означает радиоактивную энергию, излучаемую радиоактивными телами в той ее особой форме, в которой она накапливается как в газе, так и в пустоте». [44] Эта энергия рассеивается согласно экспоненциальному закону и характеризуется постоянной времени.

В работе № 60 исследуется закон убывания активности твердых тел после устранения их от действия эманации радия. Устанавливается, что в начале кривых дезактивации наблюдаются некоторые отступления от простого экспоненциального закона, зависящие от продолжительности активации. Только по прошествии некоторого времени кривая дезактивации оказывается независимой от продолжительности активации и может быть эмпирически представлена в виде разности двух экспоненциальных функций. Установлена независимость закона дезактивации от природы активируемых твердых тел. Исключение составляют целлулоид и каучук.

По вопросу о природе эманации долгое время существовало несколько мнений. Трудности, которые были связаны с этим вопросом, состояли в том, что эманация эммитировалась радием в столь малых количествах, что не было возможности его решить с помощью обычных физических и химических средств. Приходилось прибегать к косвенным методам, пользуясь тем, что о количестве эманации можно судить по ее радиоактивности. Кюри и Данн (№ 62) воспользовались явлением диффузии газов и показали, что эманация диффундирует подобно газам с очень малой концентрацией и коэффициент диффузии ее близок по величине к коэффициенту диффузии некоторых известных газов.

---

[44] См. наст. изд., стр. 280.

Еще в 1902 г., исследуя явления радиоактивности тория и наведенную радиоактивность, создаваемую торием, Резерфорд и Содди [45] объяснили их, исходя из следующих соображений: они предположили, что явления наведенной радиоактивности связаны с существованием нескольких особых радиоактивных веществ, причем возникновение и исчезновение наведенной радиоактивности указывает на образование или разрушение этих веществ. Они называли торием X гипотетическое вещество, непрерывно порождаемое торием; активность тория X составляет существенную часть активности солей тория. Этот торий X порождает эманацию тория, а эта последняя вызывает наведенную активность тория, состоящую из осадков новых активных веществ, которым было дано название торий А и торий В.

В совместной с Данном работе (№ 69) Пьер Кюри анализирует кривые, описывающие дезактивацию твердых тел, активируемых радием, принимая эту точку зрения Резерфорда и применяя ее к радию. Кюри показал, что можно проанализировать наблюденные кривые дезактивации и сделать заключение о числе активных веществ, происходящих одно из другого, и определить коэффициенты экспонент, характеризующих их распад. Согласно Кюри, надо предположить существование нескольких активных веществ, производимых эманацией радия (RaEm), следующих друг за другом и названных радием А, радием В и радием С. Кроме того, согласно Кюри, надо предположить, что вещества А и С активны, а вещество В неактивно, оно только распадается, порождая вещество С.

Эти законы образования и распада активных веществ совершенно такие же, как у обычных химических веществ в случае мономолекулярных превращений, но в отличие от химических реакций в этом случае постоянная распада не зависит от внешних условий.

Кюри и Данн вычислили период полураспада этих трех веществ, он оказался равным 2.6 мин. у радия А, 21 мин. — у радия В и 28 мин.— у радия С.

Полное истолкование явлений наведенной радиоактивности дано Резерфордом в его работе 1904 г. [46]

В последней работе Пьера Кюри совместно с Данном (работа № 70) исследовано влияние нагревания активированных тел на кривые дезактивации. Наблюденные кривые были интерпретированы в предположении существования трех промежуточных продуктов распада А, В и С.

Одним из весьма замечательных результатов, полученных в те годы при изучении явлений радиоактивности, было открытие радиоактивного

---

[45] E. Rutherford, F. Soddy, Trans. Chem. Soc., 81, 321, 837, 1902; Phil. Mag., 4, 370, 569, 1902; 5, 441, 445, 1903.

[46] E. Rutherford, Phil. Trans. Roy. Soc., A204, 169, 1905.

происхождения гелия. Уже раньше было замечено, что гелий обнаруживается в значительных количествах в минералах, содержащих уран и торий. Исходя частично из этого факта, а также из некоторых других, Резерфорд и Содди [47] допустили, что гелий представляет собой продукт распада радиоэлементов. Рамзай и Содди [48] обнаружили линию спектра гелия в газе, образовавшемся в воде при растворении в ней бромистого радия. В работе № 68 Пьер Кюри совместно с Дж. Дьюаром сообщают, что в спектре газа, выделяемого бромистым радием и окклюдированного стенками кварцевой ампулки, который был по их предложению исследован Деландром, обнаружен полный спектр гелия. Этот опыт подтвердил радиоактивное происхождение гелия.

Эти опыты имели весьма существенное значение; они показали, что в явлениях радиоактивности происходят преобразования вещества, в результате которых образуются не только новые радиоактивные вещества, но также и нерадиоактивные вещества, ранее известные, такие, как гелий.

В статье Кюри, написанной совместно с Бушаром и Балтазаром, известными французскими врачами и биологами (№ 72), сообщается об опытах по изучению физиологического действия эманации радия на мышах и морских свинках, в которых было установлено токсическое действие эманации радия, вводимой через дыхательные пути, и действие ее на кожный покров. Это были первые опыты по изучению радиоактивных поражений организма, против которых долгое время не принималось достаточных мер защиты.

Отметим здесь две работы П. Кюри (№№ 46 и 54), осуществленные им совместно с Саньяком, по изучению рентгеновских лучей. Они были опубликованы тогда, когда изучение свойств рентгеновских лучей только начиналось, когда сама природа рентгеновских лучей была еще далеко не ясна.

Еще сам Рентген заметил, что тела, на которые падают рентгеновские лучи, сами становятся источником подобных же лучей. Ряд исследователей (Бенуа, Перрен, Тоунсенд, Саньяк и др.) показали, что существенная часть этого вторичного излучения имеет иной состав, чем первичное излучение. Особенно усиленно изучал свойства вторичного излучения Саньяк. Было обнаружено, что в состав вторичных лучей входит малопроникающее излучение, полностью поглощаемое в воздухе при атмосферном давлении на пути длиной только в несколько миллиметров.

Дорн [49] показал, что часть вторичного излучения испытывает отклонение в магнитном поле, причем направление отклонения соответствует

---

[47] E. Rutherford, F. Soddy, Phil. Mag., 4, 569, 1902; 5, 441, 561, 1903.

[48] W. Ramsay, F. Soddy, Nature, 68, 246, 1903; Proc. Roy. Soc., A72, 204, 1903; 73, 346, 1904.

[49] F. E. Dorn, Abh. der Naturforsch. Ges. zu Halle, 22, 39, 1900.

отрицательному знаку заряда. Опыты Кюри и Саньяка подтвердили этот факт. Они предварительно убедились с помощью цилиндра Фарадея, что первичные рентгеновские лучи не несут заряда. Путем непосредственных измерений они обнаружили, что металлические пластинки, на которые падают рентгеновские лучи, заряжаются положительно, т. е. испускают отрицательные заряды. Позже, в 1907 г., Бестельмейер [50] определил отношение заряда к массе этих отрицательных частиц и нашел, что оно соответствует электронам.

Кюри и Саньяк наблюдали здесь фотоэлектрический эффект, вызываемый рентгеновскими лучами. В конце своей статьи они сами отмечают подобие между явлениями, наблюденными ими в рассматриваемых работах, и теми явлениями фотоэлектричества, которые как раз в те годы наблюдал Ленард с ультрафиолетовыми лучами.

Свои взгляды на явления радиоактивности и истолкование их Пьер Кюри излагал попутно во многих из рассмотренных здесь его работ. Одна из его статей, относящаяся к 1902 г. и написанная им совместно с Марией Кюри, почти целиком посвящена этому вопросу (№ 55). В конце этой статьи П. Кюри высказывает свои взгляды на гипотезы, выдвигаемые для толкования открываемых новых явлений (см. наст. изд., стр. 270). Здесь П. Кюри высказывает необходимость соблюдать крайнюю осторожность в создании рабочих гипотез. По мнению Коттона, [51] Кюри опасался, что приверженность к слишком определенной гипотезе, пока для нее еще не существует достаточно обоснованных и всеобъемлющих опытных подтверждений, делает исследователя недостаточно беспристрастным, поскольку тогда имеется стремление приписывать наибольшее значение фактам, благоприятствующим этой частной гипотезе.

В этом отношении интересно проследить все работы П. Кюри по наведенной радиоактивности и убедиться, с какой постепенностью и осторожностью он мало-помалу присоединялся к гипотезе об эманациях как о радиоактивных газах, выдвинутой Резерфордом. Сам Кюри не избегал гипотез, хотя они носили весьма общий характер, подобно тем двум гипотезам, которые он выдвигал относительно сущности явлений радиоактивности в указанной работе и которые он неоднократно повторял в своих других работах.

В связи с этими высказываниями П. Кюри о гипотезах здесь уместно отметить, что в начале 90-х годов, когда, вероятно, под влиянием больших успехов, достигнутых тогда термодинамическим описанием явлений, многие физики стали отходить от молекулярных представлений, Пьер

---

[50] A. Bestelmeyer, Ann. der Phys., 22, 429, 1907.

[51] A. Cotton. La publication des Oeuvres de P. Curie. Rev. gen. des Sciences, **20**, № 10, 438—443, 1909.

Кюри отнесся явно несочувственно к этой тенденции. В своей рецензии на книгу Соре (№ 29) он писал: «Г-н Пуанкаре в своем курсе в Сорбонне и г-н Соре . . . представляют собой физиков, все меньше и меньше интересующихся слишком детальными молекулярными гипотезами и не принимающих уже больше эти гипотезы за исходные основы для построения теорий. Однако такие тенденции не являются абсолютно всеобщими: так, теория газов, стереохимические теории, теории, касающиеся строения кристаллических тел, идут совершенно противоположным путем». Далее он отмечает, что при выводе всех возможных видов симметрии, пользуясь теорией кристаллической решетки, фактически исходят из молекулярных представлений.

Заканчивая обзор работ Пьера Кюри по радиоактивности,[52] приведем весьма знаменательные заключительные слова его речи, произнесенной 6 июня 1905 г. в Стокгольме в связи с получением им Нобелевской премии (№ 74):

«Легко понять, что в преступных руках радий может представить серьезную опасность, и встает вопрос: выиграет ли человечество от познания тайн природы, достаточно ли оно созрело, чтобы ими пользоваться, или это познание обратится ему во вред? Пример открытий Нобеля показателен в этом отношении: мощные взрывчатые вещества позволили человеку выполнить замечательные работы, но они же стали ужасным разрушительным средством в руках великих преступников, толкающих народы к войне. Я отношусь к числу тех, кто думает вместе с Нобелем, что человечество извлечет больше пользы, чем вреда из новых открытий».

Помимо рассмотренных работ по кристаллографии, магнетизму и радиоактивности, Пьер Кюри написал ряд статей и по другим разделам физики, в которых содержатся важные и интересные результаты, им полученные.

В работе «Несколько замечаний о приведенном уравнении Ван-дер-Ваальса» (№ 22) Пьер Кюри показал, что, исходя из уравнения состояния, выражаемого формулой Ван-дер-Ваальса, можно получить бесконечное множество *приведенных уравнений*, из которых то приведенное уравнение, которое было получено самим Ван-дер-Ваальсом и которое основано на выборе критических значений переменных состояния в качестве единиц этих переменных, есть только один возможный частный случай, правда, очень удобный. Такое расширение возможных видов приведенных термических уравнений состояния приводит к следующему свойству *соответственных состояний*. У Ван-дер-

[52] Подробный обзор работ М. и П. Кюри по радиоактивности см. в кн.: О. Л. *Старосельская-Никитина*. История радиоактивности и возникновения ядерной физики. Изд. АН СССР, М., 1963.

Ваальса таковыми были состояния разных веществ, которые соответствуют одному и тому же решению приведенного уравнения. Согласно Кюри, каковы бы ни были исходные приведенные уравнения, состояния, которые соответствуют решениям этих уравнений, будут те же самые.

К подобным же результатам пришли Натансон, Мелин и Амага.[53]

В заключение своей статьи Кюри указывает, что представление о приведенных уравнениях может быть обобщено и использовано и для других соотношений между механическими и физическими величинами и оно тесно связано с вопросом об однородности величин в уравнениях, выражающих эти соотношения.

Заметка «О проводимости твердых диэлектриков» (№ 26) представляет собой краткое изложение выступления Пьера Кюри на заседании Французского физического общества с сообщением о замечательном исследовании его брата Жака, опубликованном в 1889 г.[54] на эту же тему, и сопоставление ее с работами Варбурга и Тегетмейера.[55]

Много времени Пьер Кюри посвящал физическим приборам. Он придумывал новые приборы, конструировал их, исследовал их свойства, точность и анализировал их возможности. Некоторые из приборов, осуществленные по его указаниям, описаны не им, а другими; например, описание пьезоэлектрического кварца изложено в диссертации Жака Кюри, квадрантный апериодический электрометр описан в статье Ледекора.

Мы уже говорили раньше о кварцевой бипластинке (см. стр. 344). Ниже дается краткое изложение работ Пьера Кюри, посвященных физическим приборам.

При конструировании физических приборов и анализе их работы Пьеру Кюри приходилось пользоваться дифференциальными уравнениями 2-го порядка, описывающими затухающие колебательные движения. Он нашел, что обычное изложение вопроса об их решениях слишком отвлеченно и не вполне отвечает запросам физиков, которым нужны не исследования общих свойств этих решений, а конкретные числовые соотношения и результаты. Чтобы при таких числовых рассмотрениях задачи не терять достаточной общности результатов, Кюри нашел целесообразным рассматривать приведенную (каноническую) форму таких уравнений,

---

[53] L. Natanson, C. r., **109**, 890, 1889; Zs. phys. Chem., **9**, 26, 1892; G. Meslin, C. r., **116**, 135, 1893; E. H. Amaga, C. r., **124**, 574, 1897; Rapp. Congr. internat. de physique, Paris, **1**, 551, 1900.

[54] **J. Curie**, Ann. de chim. et de phys., **17**, 385; 18, 203, 1889.

[55] **E.** Warburg, F. Tegetmeyer, Wied. Ann., **31**, 622, 1884; **32**, 482, 1887; 35, 455, 1889; **41**, 18, 1890; Gött. Nachr., 210, 1888.

в которые в качестве переменных входят не сама элонгация и время, а отношение элонгации к амплитуде и отношение времени к периоду колебаний при отсутствии затухания. В работе «О приведенных уравнениях для расчета затухающих движений» (№ 23) вместо коэффициента затухания Кюри вводит отношение его к такому его значению, которое дает критическое движение (переход к апериодическому движению). Здесь Кюри воспользовался приемом, подобным тому, с помощью которого получают приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса.

Статья содержит таблицы и графики, облегчающие получение числовых значений решений приведенных уравнений, и указаны примеры и приемы пользования этими таблицами.

Отметим, что при расчетах этих таблиц Пьеру Кюри помогали его ученики в Школе физики и химии, одним из которых был Поль Ланжевен.

В связи со статьей Пьера Кюри «О применении конденсатора с защитным кольцом и об абсолютном электрометре» (№ 24) приведем здесь выдержку из воспоминаний Ланжевена о Кюри: «На одном из заседаний Физического общества Пьер Кюри сделал остроумное сообщение по поводу устройства и способа применения эталонных конденсаторов с охранным кольцом. Это сообщение обнаружило редкую глубину понимания электростатики — области науки, в то время особенно мало известной, когда ей придавали довольно мало значения.

«На одной из двух совершенно параллельных посеребренных стеклянных поверхностей, составляющих эталонный конденсатор, алмазом процарапана тонкая круговая риска, отделяющая центральную часть от периферической, образующей охранное кольцо. Обе эти части неизбежно плохо изолированы друг от друга этой узкой и длинной бороздкой, разделяющей их, так что, если присоединить центральный диск к электрометру, то производить точные измерения очень затруднительно.

«С помощью довольно неочевидного применения к коэффициентам влияния одной теоремы взаимности Кюри показал, что одним ударом можно снять все трудности, связанные с изоляцией, если соединить электрометр с другой пластинкой, не имеющей охранного кольца и хорошо изолированной кварцевыми прокладками, отделяющими ее от первой пластинки. Подлежащая измерению разность потенциалов, вместо того чтобы устанавливаться между двух пластинок, устанавливается теперь между центральным диском и его кольцом, и, хотя это последнее уже больше не функционирует обычным способом, результат (т. е. заряд, вызываемый индукцией на изолированной пластинке) остается строго тем же самым, что и в первой установке.

«Лорд Кельвин, отец электрометров и охранного кольца, присутствовавший на том заседании, решил, что здесь имеется ошибка, и сказал об этом Пьеру Кюри. Но на следующий день этот знаменитый почти семидесятилетний ученый пришел в лабораторию Кюри повидать молодого препаратора, чтобы взять обратно то, что он сказал накануне . . . С тех

пор он не пропускал случая высказать свое самое высокое мнение, которое он имел о моем учителе».[56]

Подобный же принцип П. Кюри предложил использовать в сферическом электрометре Липпмана. Внутренняя сфера подвешена к коромыслу весов. Внешняя сферическая оболочка разрезана по экватору на две полусферы, изолированные друг от друга; верхняя полусфера заземлена, нижняя присоединена к элементу. С помощью весов измеряют силу, действующую на внутреннюю сферу.

В работе «Об астатическом электрометре, который может служить в качестве ваттметра» (совместно с П. Блондло) (№ 19), описано видоизменение квадрантного электрометра Томсона. Цилиндрическая коробка вместо разделения на четыре квадранта разделена на две части. Стрелка-бисквит, обычно имеющая форму цифры 8, заменена круглым диском, разделенным узкой щелью на две части. Его преимущество по сравнению с обычным квадрантным электрометром состоит в том, что отклонения диска остаются пропорциональными напряжению в значительно более широких пределах.

Две части коробки и две части диска имеют разные потенциалы. Показания прибора пропорциональны произведению разности потенциалов частей коробки и разности потенциалов частей диска. Если одна из этих разностей равна разности потенциалов на зажимах некоторого источника тока, а другая — разности потенциалов на концах некоторого известного сопротивления, через которое протекает этот ток, то показания прибора пропорциональны мощности; прибор работает как ваттметр. Дальнейшее усовершенствование этой формы электрометра произвел Долецалек, который назвал эту форму электрометра «бинантным электрометром».[57]

Статья Ледекора «Новые апериодические квадрантные электрометры»[58] содержит теорию квадрантного электрометра; в ней описано предложение П. Кюри сделать коробку квадрантного электрометра стальной и намагниченной; тогда при движении стрелки в ней развиваются токи Фуко, благодаря которым происходит затухание этой стрелки.

Статья содержит ряд замечаний и указаний Пьера Кюри, сообщенных автору и касающихся конструирования, испытания этого электрометра и пользования им при измерениях.

В статье «Различные опыты с весами» (№ 64) описаны опыты по испытанию и определению следующих параметров точных весов: период колебаний коромысла без чашек, расстояние центра тяжести коромысла от оси, момент инерции коромысла, разность длин плеч коромысла, чувстви-

[56] P. Langevin, Revue du Mois, 2, 18, 1906.
[57] F. Dolezalek, Ann. der Phys., 26, 312, 1908.
[58] P. H. Ledecoer, Lumière électrique, 22, 14, 57, 155, 1886.

тельность весов, когда ребра трех ножей не лежат в одной плоскости, затухание колебаний весов, изменение чувствительности весов в зависимости от смещения центра тяжести, влияние изменения температуры.

В работе «О точных апериодических весах и о непосредственном отсчете последних цифр значения веса» (№ 21) описаны весы, снабженные микрометром, неподвижным отсчетным микроскопом и воздушным демпфером.

В таких весах нет необходимости пользоваться гирями весом меньше 0.1 г; весы можно оставить с несколько наклоненным коромыслом в результате разницы веса на обеих чашках весов; после двух-трех колебаний последние полностью затухают в некотором положении равновесия, и по микрометру непосредственно отсчитывают последние значащие цифры веса с точностью 0.25—0.1 мг.

В работе «Трансмиссионный динамометр с оптической системой измерения» (№ 14) описан оптический динамометр, измеряющий угол кручения трансмиссионного вала, имеющего вид металлической трубы, во время его вращения. Концы вала закрыты двумя кварцевыми пластинками в полволны, вырезанными параллельно оптической оси. Если угол между осями пластинок в результате кручения вала равен α, то плоскость поляризации проходящего пучка лучей поворачивается на угол 2α. Таким образом, по углу поворота плоскости поляризации может быть определен угол кручения α.

В заключение приведем некоторые сведения о незавершенных и неопубликованных работах Пьера Кюри. Об этом рассказывает Мария Кюри в своем предисловии к французскому изданию трудов П. Кюри:

«Нисколько не заботясь об извлечении из своих работ какой-либо выгоды для приобретения материальных благ или для удовлетворения самолюбия, он рассматривал всякую свою публикацию только как логическое завершение полученного результата, как сообщение некоторых фактов или ясно понятых и взаимоувязанных идей. Он никогда не позволял себе скороспелых публикаций только для того, чтобы отметить срок их опубликования; он искренне считал, что качество работы более существенно, чем имя ее автора. Когда ему говорили по этому поводу, он спокойно отвечал: «Что за важность, что не я опубликовал такую работу, если ее опубликовал другой».

«Много экспериментов, относительно которых он не составил себе достаточно ясного мнения, могущего его удовлетворить, вовсе не было опубликовано; ему случалось в течение длительного времени заниматься каким-нибудь вопросом и получать небезынтересные результаты, и он ничего, однако, не опубликовал по этому вопросу.

«Среди очень широкого круга вопросов, которые его интересовали, он охотно выбирал те, которые не привлекали к себе внимание других исследователей и которыми он имел возможность заняться спокойно и без спешки. После открытия радия, когда к изучению радиоактивности приступили многие ученые, Пьер Кюри плохо привыкал к лихорадочной спешке и многочисленности публикаций.

«Он часто порывался оставить на время этот предмет, в котором его труды, однако, имели столь решающее значение, и укрыться в областях науки, более спокойных и более благоприятных для размышлений. В особенности он хотел снова взяться за свои исследования по симметрии кристаллических сред. . .

«В последние годы своей жизни Пьер Кюри предпринял ряд работ о направленных величинах и о том, как они проявляются в физических явлениях, возвращаясь таким образом снова к тому предмету, который никогда не переставал его заботить.

«К тому же кругу идей относится начатая им теоретическая работа, в которой предполагалось представить явления упругости в кристаллах свойствами кристаллической решетки, в узлах которой, как он предполагал, находятся молекулы, действующие друг на друга силами и парами сил, подобно элементарным магнитам. Он при этом пришел к некоторым результатам, относящимся к ряду наиболее правильных систем кристаллов.

«Не считая a priori невозможным существование тел, проводящих магнетизм, и существование свободного магнетизма, он провел некоторое число опытов по разысканию этого явления. Признав, что сфера, заряженная свободным магнетизмом, должна была бы обладать теми же элементами симметрии, что и сфера, заполненная жидкостью, обладающей вращательной способностью, он провел разные опыты в этом направлении. Результаты были отрицательными; работа не была опубликована.

«В 1896 г. он начал работу по росту кристаллов. Эта работа состояла в измерении растворимости и скорости роста различных граней кристалла. Скорость роста оценивалась по увеличению веса кристалла, подвешенного к чашке весов и находящегося в контакте с насыщенным раствором только одной своей гранью, остальные грани были покрыты лаком. Скорость роста оказалась разной для разных граней, хотя растворимость была одна и та же. Во время создания помещения с постоянной температурой для проведения этих тонких экспериментов Пьер Кюри был принужден прервать эту работу, чтобы приняться совместно со мной за исследование новых радиоактивных элементов. Эта оставленная работа не была опубликована. Пьер Кюри все время надеялся к ней вернуться и закончить. Он хотел также уяснить себе, на какое расстояние простираются молекулярные действия, которые определяют рост кристалла, и для этого предполагал покрывать тонким слоем золота поверхность кристалла, находящуюся в контакте с раствором.

«Он хотел исследовать симметрию некоторых кристаллов путем изучения поглощения света и его изменения с температурой.

«Он несколько раз пытался обнаружить существование сильнодиамагнитных тел, но безуспешно.

«Его занимал также вопрос о природе электрической проводимости и ее связи с диэлектрическими свойствами, в особенности в телах с большой диэлектрической постоянной, как вода или нитробензол, рассматриваемые как промежуточные между изоляторами и проводниками. Полупроводящие тела, такие, как кристаллизованная окись железа, гематит, олигист, магнетит, ему казались столь же интересными с этой точки зрения, и он много времени посвятил экспериментальным исследованиям в этом направлении. Но будучи неудовлетворенным полученными результатами, он не опубликовал эту работу».[59]



[59] P. Curie, Oeuvres, Paris, 1908, pp. X, XVII—XIX.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КВАРЦ

(Выдержка из диссертации Ж. Кюри) *

Описание пьезоэлектрического кварца

Те методы, которыми я пользовался для исследования проводимости диэлектриков и их диэлектрических постоянных, были основаны на применении одного прибора, построенного нами, моим братом и мною, несколько лет тому назад и представленного на годовом заседании Физического общества и на Электрической выставке, имевшей место в Обсерватории в 1885 г.[1] Я считаю необходимым описать здесь этот прибор и изложить его свойства с некоторыми подробностями, прежде всего потому, что все измерения, содержащиеся в настоящей работе, были проведены с его помощью и, что, следовательно, использованные нами методы не могут быть поняты, пока его свойства не станут с самого начала хорошо известны. Наконец, еще и потому, что он работает с такой правильностью (никогда не возникала необходимость какой-либо починки или повторения какого-либо опыта, вызванного какими-либо его ошибками), что, однажды испробовав, его несомненно оценят физики и с успехом используют во множестве тех исследований, в которых он может быть применен.

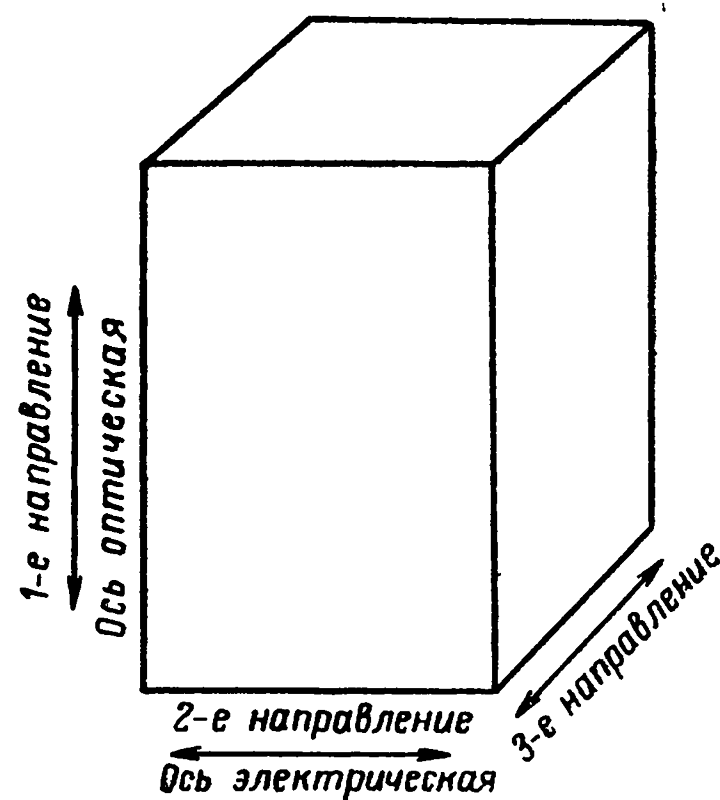


Рис. 1.

Основную часть составляет кварц, отшлифованный так, как это будет описано ниже, и действующий в силу своих пьезоэлектрических свойств.

* Эта статья составляет часть диссертации Жака Кюри «Изучение диэлектрической постоянной и проводимости кристаллических тел», напечатанной в Ann. de chim. et de phys., 17, 392; 18, 203, 1889. Эта часть диссертации помещена также в «Oeuvres», стр. 553. (*Ред.*).

[1] Этот прибор был построен Бурбузом (Bourbouze).

Известно, что некоторые кристаллы, а точнее вообще все кристаллы, не имеющие центра симметрии, обладают свойством выделять в определенных точках, расположенных у концов одного направления, равные по величине и противоположные по знаку количества электричества, если их подвергать сжатию или растяжению вдоль некоторых направлений.[2] Кварц — одно из таких тел. Изобилие, с которым его находят в природе, и еще более того, чистота и величина его кристаллов определяют выбор его и делают значительно предпочтительным по сравнению со всеми другими пьезоэлектрическими веществами. Представим себе кварцевый параллелепипед, вырезанный так, что две его грани перпендикулярны оси симметрии 3-го порядка (совпадающей с оптической осью); две другие грани перпендикулярны осям симметрии 2-го порядка (которые соединяют середины двух вертикальных ребер призмы e^2*) еще две грани параллельны граням призмы и, следовательно, параллельны одновременно и оси 3-го порядка и одной из осей симметрии 2-го порядка (рис. 1).

Если производить растяжение (или сжатие) вдоль оси 2-го порядка, то на обоих концах этой оси выделяются равные по величине, но противоположные по знаку количества электричества [q], пропорциональные действующему усилию и независящие от размеров кварцевого параллелепипеда. Мы назвали это направление *электрической осью кварца*. Таким образом, для растяжения в этом направлении мы имеем

$$q = Kp,$$

где K — характеристическая постоянная, а p — груз, вызывающий растяжение.

Если производить растяжение вдоль направления оптической оси, то не будет наблюдаться никакого электрического явления ни в одной точке кристалла.

Если же производить растяжение вдоль третьего направления, т. е. перпендикулярно оптической и электрической осям, то мы опять заметим выделение полярного электричества на обоих концах электрической оси. Это количество выделившегося электричества также пропорционально действующему усилию, но оно уже более не будет независимым от размеров пластинки. Оно пропорционально длине l вдоль третьего направления, именно вдоль того, по которому происходит растяжение; обратно пропорционально толщине e вдоль электрической оси и не зависит от размеров вдоль оптической оси; это количество, таким образом, представляется формулой

$$q = \frac{Klp}{e}.$$

---

[2] J. et P. Curie, C. r., 1880—1881; J. de phys., 1, 245, 1882. [Наст. изд., стр. 17 и 21].

* Об этих обозначениях граней и ребер кристаллов по системе Гаюи—Леви, применяемых братьями Кюри, см. прим. II [2], стр. 382. (*Ред.*).

Коэффициент K, входящий в эту формулу, — тот же самый, что был и в предыдущей формуле.

Отсюда следует, что если придать параллелепипеду достаточную длину вдоль третьего направления, очень малую толщину в направлении электрической оси, то получится кварцевая пластинка, выделяющая при растяжении вдоль третьего направления количество электричества, значительно большее, чем то, которое можно было бы выделить при таком же растяжении, производимом вдоль электрической оси.

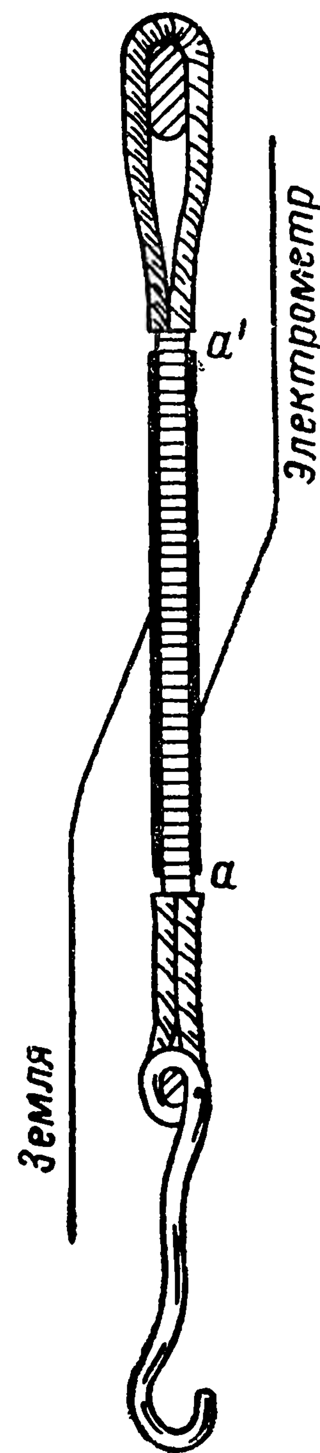
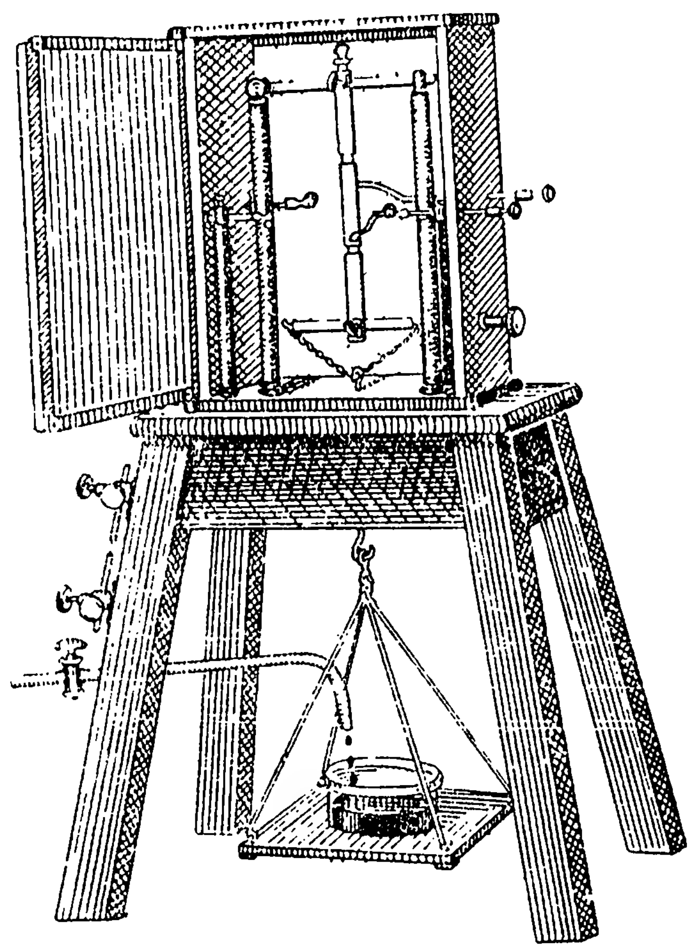


Рис. 2.

Практически можно легко получить очень чистые кристаллы кварца, позволяющие изготовлять пластинки длиной порядка 10 см. Придавая им толщину 0.5 мм вдоль электрической оси и ширину 2 см вдоль оптической оси, можно развивать тягу до 5 кг и при этом иметь возможность чувствовать с помощью электрометра действие добавочного груза в 0.5 г.

Таким образом, мы обладаем прибором, способным выделять количество электричества, пропорциональное весу и изменяющееся в пределах от 1 до 10 000.

Абсолютные измерения пьезоэлектрической постоянной кварца, которые мы, мой брат и я, опубликовали несколько лет назад, дали $K=0.062$ (p выражается в килограммах, q — в абсолютных электростатических единицах CGS).[3] Таким образом, легко изготовить пластинки, выделяющие абсолютную электростатическую единицу CGS при тяге в 1 кг.


Рис. 3.

Для собирания электричества обе грани кварца, перпендикулярные электрической оси, делают проводящими, посеребрив их, либо просто заклеивая их двумя листочками олова. Одна из граней постоянно заземлена, другая — соединена с электрометром (рис. 2).

Длина l, содержащаяся в формуле, есть расстояние между двумя точками a и a'.

Один из длинных концов кварца прикреплен с помощью плотной латунной полосы, одновременно крепкой и гибкой, к металлическому бруску,

[3] Эта пьезоэлектрическая постоянная в абсолютных единицах CGS (т. е. p выражено в динах) равна $6.32 \cdot 10^{-8}$.

который можно подвесить. К нижней части прикреплена пластина, предназначенная для помещения растягивающих грузов. Все это закрыто в металлический ящик, внутри хорошо высушенный, в котором проделаны маленькие отверстия, через которые проходят:

1) сбоку — проводящие стержни, прикрепленные к эбонитовым подставкам и позволяющие соединить грани кварца с электрометром;

2) в нижней части — стержень с крючком, к которому привешена пластинка с грузами.

Рис. 3 позволяет видеть общий вид прибора.*

Этот прибор может быть применен для разных целей, в частности для измерения емкостей, диэлектрических постоянных, слабой проводимости и электродвижущих сил. Мы, вообще говоря, пользовались им так, чтобы в опытах показания электрометра приводились к нулю. Таким образом, электрометр действовал как электроскоп.



* «В нижней части рис. 3 видно устройство, примененное Жаком Кюри и позволившее ему медленно наливать ртуть в кристаллизатор, помещенный на платформу для грузов, и таким путем непрерывным образом изменять заряд кварца и тем компенсировать в каждый момент прибыль электричества, обусловленную проводимостью исследуемого тела». (*Прим. Ред. французского издания трудов П. Кюри*).

БИБЛИОГРАФИЯ ТРУДОВ П. КЮРИ[1]

1. Исследования по определению длины волны тепловых лучей при низких температурах. Совместно с П. Дезэном.
C. r., 90, 1506—1509, 1880; Oeuvres, pp. 1—5.

2. Образование полярного электричества под действием давления в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 91, 294—295, 1880; Bull. Soc. Mineral. de France, 3, 90—93; 1880; Oeuvres, pp. 6—9; наст. изд., I, стр. 9—10.

3. О полярном электричестве в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 91, 383—386, 1880; Oeuvres, pp. 10—14; наст. изд., II, стр. 11—14.

4. Законы выделения электричества в турмалине под действием давления. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 92, 186—188, 1881; Oeuvres, pp. 15—17; наст. изд., III, стр. 15—16.

5. Об электрических явлениях в турмалине и в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 92, 350—353, 1881; Oeuvres, pp. 18—21; наст. изд., IV, стр. 17—20.

6. Гемиэдрические кристаллы с косыми гранями как постоянные источники электричества. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 93, 204—207, 1881; Oeuvres, pp. 22—25; наст. изд., V, стр. 21—23.

7. Сжатия и растяжения, производимые электрическим напряжением в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 93, 1137—1140, 1881; Oeuvres, pp. 26—29; наст. изд., VI, стр. 24—26.

8. Электрические деформации кварца. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., 95, 914—917, 1882; Ouevres, pp. 30—32; наст. изд., VII, стр. 27—29.

9. Электрические явления в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. Совместно с Ж. Кюри.
Bull. de séances de la Soc., franç. de phys.,Paris,[2] 20—27, 1882; J. de phys., (II), 1, 245—251, 1882.

10. О вопросах упорядоченности, повторяемости.
Bull. Soc. mineral. France, 7, 89—111, 1884; Oeuvres, pp. 56—79; наст. изд., IX, стр. 49—65.

---

[1] Работы П. Кюри расположены в хронологической (приблизительно) последовательности. Работы, помещенные во французском издании трудов П. Кюри (Oeuvres de Pierre Curie, publiées par lea soins de la Société Français de Physique, Paris, 1908), снабжены пометой «Oeuvres» с указанием страницы; работы же, помещенные в настоящем издании, снабжены пометой «наст. изд.» с указанием страницы; римская цифра означает порядковый номер этой статьи в настоящем издании.

[2] В дальнейшем приводится сокращенно: Séances Soc. phys., Paris.

11. О симметрии.
Bull. Soc. mineral. France, 7, 418—457, 1884; Oeuvres, pp. 78—113; наст. изд., X, стр. 66—94.
12. Об образовании кристаллов и о капиллярной постоянной их различных граней.
Bull. Soc. mineral. France, 8, 145—150, 1885; Oeuvres, pp. 153—157; наст. изд., XII, стр. 114—117.
13. О повторяемости и о симметрии.
C. r., **100**, 1393—1396, 1885; Oeuvres, pp. 114—117.
14. Трансмиссионный динамометр с оптической системой измерения.
C. r., **103**, 45—46, 1886; Oeuvres, pp. 551—553.
15. О пьезоэлектрических явлениях.
Séances Soc. phys., Paris, 47, 1887; Oeuvres, pp. 33—34.
16. Экспериментальные исследования электрических деформаций пьезоэлектрических кристаллов. Совместно с Ж. Кюри.
Lumière electrique, **30**, 465—469, 1888.
17. Электрическое растяжение кварца. Совместно с Ж. Кюри.
Lumière electrique, 30, 521—524, 575—577, 1888; Séances Soc. phys., Paris, 237—256, 1888; J. de phys., (II), 8, 149—168, 1889; Oeuvres, pp. 35—55; наст. изд., VIII, стр. 30—46.
18. Об электрометре с бипластинкой кварца. Совместно с Ж. Кюри.
C. r., **106**, 1287—1289, 1888.
19. Об астатическом электрометре, который может служить в качестве ваттметра. Совместно с П. Блондло.
C. r., **107**, 867, 1888; Séances Soc. phys., Paris, 358—364, 1888; J. de phys., (II), 8, 80—82, 1889; Bull. Soc. scient., Nancy, 148—154, 1889; Oeuvres, pp. 587—590.
20. Об электрическом растяжении кварца. Совместно с Ж. Кюри.
Lumière electrique, **31**, 66—70, 1889.
21. О точных апериодических весах и о непосредственном отсчете последних цифр значения веса.
C. r., **108**, 663—666, 1889; Séances Soc. phys., Paris, 218—230, 1889; J. de phys., (II), **9**, 138, 1890; Oeuvres, pp. 530—548.
22. Несколько замечаний о приведенном уравнении Ван-дер-Ваальса.
Arch. sci. phys. et naturelles, Genève, **26**, 13—20, 1891; Oeuvres, pp. 214—219.
23. О приведенных уравнениях для расчета затухающих движений.
Lumière electrique, **41**, 201—209, 270—276, 307—314, 356—362, 1891; Oeuvres, pp. 158—213.
24. О применении конденсатора с защитным кольцом и об абсолютном электрометре.
C. r., 115, 1068—1072, 1892; Séances Soc. phys., Paris, 377—383, 1892; Oeuvres, pp. 224—231.
25. Магнитные свойства тел при разных температурах.
C. r., **115**, 805—808, 1892.
26. О проводимости твердых диэлектриков.
Séances Soc. phys., Paris, 261, 277—278, 1892; Oeuvres, pp. 220—223.
27. О магнитных свойствах кислорода при разных температурах.
C. r., **115**, 1292—1295, 1892.
28. Магнитные свойства тел при разных температурах.
C. r., **116**, 136—139, 1893.
29. По поводу книги «Основы физической кристаллографии» Ш. Соре; Библиографические заметки и замечания по поводу кристаллографии.
Arch. sci. phys. et naturelles, Genève, 29, 337—354, 1893; Oeuvres, pp. 145—152.
30. О симметрии магнитного и электрического полей.
Eclairage électrique, 1, 627—636, 1894.

31. Магнитные свойства железа при разных температурах.
C. r., 118, 796—800, 859—862, 1894.
32. Магнитные свойства тел при разных температурах.
C. r., 118, 1134—1136, 1894.
33. О симметрии в физических явлениях; симметрия электрического и магнитного полей.
Séances Soc. phys., Paris, 53—75, 1894; J. de phys., (III), 3, 393, 1894; Oeuvres, pp. 118—141; наст. изд., XI, стр. 95—113.
34. О возможности существования магнитной проводимости и свободного магнетизма.
Séances Soc. phys., Paris, 76—77, 1894; Oeuvres, pp. 142—144.
35. Магнитные свойства тел при разных температурах.
Ann. de chim. et de phys., (VII), 5, 289—407, 1895; Oeuvres, pp. 232—334; наст. изд., XIII, стр. 121—195.
36. Магнитные свойства тел при разных температурах.
J. de phys., (III), 4, 197—212, 263—272, 1895.
37. О новом радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде. Совместно с М. Кюри.
C. r., 126, 175—178, 1898; Oeuvres, pp. 335—338; наст. изд., XIV, стр. 199—201.
38. Об одном новом сильно радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде. Совместно с М. Кюри и Ж. Бемонтом.
C. r., 127, 1215—1217, 1898; Oeuvres, pp. 339—342; наст. изд., XV, стр. 202—204.
39. О радиоактивности, вызываемой лучами Беккереля. Совместно с М. Кюри.
C. r., 129, 714—716, 1899; Oeuvres, pp. 343—345; наст. изд., XVI, стр. 205—207.
40. Химические действия, производимые лучами Беккереля. Совместно с М. Кюри.
C. r., 129, 823—825, 1899; Oeuvres, pp. 346—348; наст. изд., XVII, стр. 208—210.
41. Действие магнитного поля на лучи Беккереля. Отклоняемые и неотклоняемые лучи.
C. r., 130, 73—76, 1900; Oeuvres, pp. 349—352; наст. изд., XVIII, стр. 211—213.
42. Об электрическом заряде отклоняемых лучей радия. Совместно с М. Кюри.
C. r., 130, 647—650, 1900; Oeuvres, pp. 353—357; наст. изд., XIX, стр. 214—217.
43. О свойствах радиоактивных тел. Совместно с М. Кюри.
Séances Soc. phys., Paris, 10*—11*, 1900.
44. Различные излучения радиоактивных тел. Совместно с М. Кюри.
Séances Soc. phys., Paris, 20*—21*, 1900.
45. О радиоактивных веществах.
Arch. sci. phys. et naturelles, Genève, 10, 388—389, 1900.
46. Отрицательная электризация вторичных лучей, создаваемых лучами Рентгена. Совместно с Ж. Саньяком.
C. r., 130, 1013—1016, 1900; Oeuvres, pp. 358—362.
47. Замечания по поводу одной недавней заметки Г. Ле-Бона. (О свойствах некоторых тел терять свою фосфоресценцию при нагревании и восстанавливать ее при охлаждении).
C. r., 130, 1072—1073, 1900; Oeuvres, p. 373.
48. Новые радиоактивные вещества и лучи, которые они испускают. Совместно с М. Кюри.
Rapports présentés au Congrès international de Physique (Paris), 3, 79, 1900; Oeuvres, pp. 374—409; наст. изд., XXI, стр. 226—253.

49. О наведенной радиоактивности, вызываемой солями радия. Совместно с А. Дебьерном.
C. r., 132, 548—551, 1901; Phys. Zs., 2, 500—501, 1901; Oeuvres, pp. 410—413; наст. изд., XXII, стр. 254—256.

50. О наведенной радиоактивности и о газах, активированных радием. Совместно с А. Дебьерном.
C. r., 132, 768—770, 1901; Phys. Zs., 2, 513—514, 1901; Oeuvres, pp. 414—416; наст. изд., XXIII, стр. 257—259.

51. Физиологическое действие лучей радия. Совместно с А. Беккерелем.
C. r., 132, 1289—1291, 1901; Oeuvres, pp. 417—419; наст. изд., XXIV, стр. 260—261.

52. О радиоактивности солей радия. Совместно с А. Дебьерном.
C. r., 133, 276—279, 1901; Oeuvres, pp. 420—423; наст. изд., XXV, стр. 262—264.

53. О наведенной радиоактивности, вызываемой солями радия. Совместно с А. Дебьерном.
C. r., 133, 931—934, 1901; Cosmos, 45, 775—777, 1901; Oeuvres, pp. 424—427; наст. изд., XXVI, стр. 265—267.

54. Отрицательная электризация вторичных лучей, испускаемых при трансформации X-лучей. Совместно с Ж. Саньяком.
Séances soc. phys., Paris, 179—187, 1901; J. de phys., (IV), 1, 13—21, 1902; Oeuvres, pp. 363—372; наст. изд., XX, стр. 218—225.

55. О радиоактивных телах. Совместно с М. Кюри.
C. r., 134, 85—87, 1902; Oeuvres, pp. 428—430; наст. изд., XXVII, стр. 268—270.

56. Проводимость жидких диэлектриков под влиянием лучей радия и лучей Рентгена.
C. r., 134, 420—423, 1902; Scient. Amer., Supplem., 57, 1904; Oeuvres, pp. 431—434; наст. изд., XXVIII, стр. 271—273.

57. О постоянной времени, характеризующей исчезновение радиоактивности, наведенной радием в закрытом сосуде.
C. r., 135, 857—859, 1902; Phys. Zs., 4, 314—318, 1903; Oeuvres, pp. 435—438; наст. изд., XXIX, стр. 274—276.

58. Об абсолютном измерении времени.
Séances Soc. phys., Paris, 60, 1902; Oeuvres, pp. 439; наст. изд., XXX, стр. 277.

59. О наведенной радиоактивности и об эманации радия.
C. r., 136, 223—226, 1903; Oeuvres, pp. 440—443; наст. изд., XXXI, стр. 278—280.

60. Об исчезновении радиоактивности, наведенной радием на твердые тела. Совместно с Ж. Данном.
C. r., 136, 364—366, 1903; Oeuvres, pp. 444—447; наст. изд., XXXII, стр. 281—283.

61. О теплоте, самопроизвольно выделяемой солями радия. Совместно с А. Лабордом.
C. r., 136, 673—675, 1903; Cosmos, 48, 436—437, 1903; Electrician (London), 50, 970, 1903; Oeuvres, pp. 448—453; наст. изд., XXXIII, стр. 284—286.

62. Об эманации радия и ее коэффициенте диффузии в воздухе. Совместно с Ж. Данном.
C. r., 136, 1314—1316, 1903; Oeuvres, pp. 452—455; наст. изд., XXXIV, стр. 287—289.

63. Об одном приборе для определения магнитных постоянных. Совместно с Ш. Шенево.
J. de phys., (IV), 2, 796—802, 1903; Oeuvres, pp. 594—603.

64. Разные опыты с весами.
Рукопись 1903 г. Впервые опубликовано: Oeuvres, pp. 517—529.

65. Последние исследования радиоактивности.
J. de chim. phys., 1, 409, 1903; Arch. sci. phys. et naturelles, Genève, 17, 241, 361, 1904; Amer. Chem. J., 31, 410—445, 1904; русск. пер. П. П. Веймарна, под ред. проф. Шредера, СПб., 1904; Phys. Zs., 5, 281—289, 313—318, 345—349, 1904; Oeuvres, pp. 456—490; наст. изд., XXXV, стр. 290—317.

66. Радий. (Лекция, прочитанная в Королевском институте в Лондоне).
Rev. scient., Paris, (V), 1, 193—200, 1904; Smithsonian Inst. Rep., 1903, pp. 187—198.

67. Радий и явления радиоактивности.
Electricien (Paris), (II), 27, (1-й семестр), 49—62, 1904.

68. Исследование газа, окклюдируемого или выделяемого бромистым радием. Совместно с Дж. Дьюаром.
C. r., 138, 190—192, 1904; Electricien (Paris), (II), 27 (1-й семестр), 125—126, 1904; J. de phys., (IV), 3, 193—194, 1904; Oeuvres, pp. 491—493; наст. изд., XXXVI, стр. 318—319.

69. Об исчезновении радиоактивности, наведенной радием на твердых телах. Совместно с Ж. Данном.
C. r., 138, 683—686, 1904; Oeuvres, pp. 494—497; наст. изд., XXXVII, стр. 320—322.

70. Закон исчезновения активности, наведенной радием, после нагревания активированных тел. Совместно с Ж. Данном.
C. r., 138, 748—751, 1904; Oeuvres, pp. 498—502; наст. изд., XXXVIII, стр. 323—327.

71. О радиоактивности газа, выделяемого водой горячих источников. Совместно с А. Лабордом.
C. r., 138, 1150—1153, 1904; Oeuvres, pp. 503—516.

72. Физиологическое действие эманации радия. Совместно с Ш. Бушаром и В. Балтазаром.
C. r., 138, 1384—1387, 1904; Oeuvres, pp. 507—511; наст. изд., стр. XXXIX, стр. 328—330.

73. О радиоактивности газов, выделяемых водой горячих источников. Совместно с А. Лабордом.
C. r., 142, 1462—1465, 1906; Oeuvres, pp. 512—516.

74. Нобелевская речь, произнесенная в Стокгольме 6 июня 1905 г. в Академии наук.
Les prix Nobel en 1903. Stokholm, 1906, стр. 66. Тр. Инст. истории естеств и техн. АН СССР, 19, 161, 1957.



ПРИМЕЧАНИЯ

I

[1] Впервые напечатано: C. r., 91, 294, 1880.

[2] Кюри Жак (1855—1941). Старший брат Пьера Кюри. Был препаратором по химии, затем по минералогии на кафедре Фриделя в Сорбонне. Здесь начались его работы совместно с братом, приведшие к открытию пьезоэлектричества. В 1883 г. переехал в Монпелье. В 1897—1900 гг. преподавал минералогию на подготовительном курсе высшей школы Алжира. Участвовал в геологическом изучении Алжира и опубликовал вместе с Г. Фламаном «Краткий очерк изверженных пород Алжира». Вернувшись в Монпелье, преподавал там минералогию и геологию, а с 1904 г. — и физику. В 1925 г. вышел в отставку. Скончался в 1941 г. В 1888 г. защищал диссертацию на Парижском факультете наук на тему: «Исследование диэлектрической постоянной и проводимости кристаллических тел», напечатанную в журнале: Ann. de chim. et phys. 17, 385, 1889; 18, 203, 1889). А. Ф. Иоффе писал, что эта работа Жана Кюри представляет собой «классическое исследование электрических свойств кварца» (см.: Изв. Политехнич. инст., **24**, 71, 1915).

[3] J. M. Gaugain, Ann. de chim. et phys., **57**, 5, 1859.

[4] «В этой методике Фриделя используется пластинка, вырезанная из кристалла перпендикулярно одной из гемиэдрических осей (только не двухсторонней). К одной из граней прикладывают нагретую латунную полусферу. В результате возникает электрическая поляризация пластинки, создающая некоторое отклонение электрометра, соединенного с полусферой. Получающееся таким образом явление и то явление, о котором идет речь в заметке П. и Ж. Кюри, — это не явления пироэлектричества, которое обычно рассматривается и которое заключается в электрической поляризации кристалла в результате равномерного изменения температуры по всей его массе; это последнее явление возникает только в гемиморфных кристаллах, обладающих, подобно турмалину, только одной осью симметрии.

«Явление, которое в действительности наблюдал Фридель, есть явление пьезоэлектричества, получающееся в результате сжатия, образующегося в кристалле благодаря неравномерному нагреванию, создаваемому металлической полусферой. Последовавшее затем открытие пьезоэлектричества дало объяснение наблюдению Фриделя, и последний сам признал его истинную природу в статье, опубликованной им совместно с Жаком Кюри (см.: C. Friedel, J. Curie, C. r., **97**, 66, 1883).» (*Прим. Ред. французского издания трудов П. Кюри*).

II

[1] Впервые напечатано: C. r., 91, 383, 1880.

[2] Здесь и дальше П. Кюри пользуется системой обозначения граней кристаллов, отличающейся от общепринятой теперь системы обозначений Миллера. Система обозна-

чений Гаюи—Леви, которой пользуется Кюри, была в ходу во Франции еще до сравнительно недавнего времени. Эта система, менее удобная в общем случае, имеет некоторые преимущества в частных случаях. В ней каждая грань обозначается только одной буквой с индексом. Подробному описанию системы обозначений Гаюи—Леви посвящена глава VI книги: G. F r i e d e l. Leçons de cristallographie. Nancy—Paris—Strasbourg, 1926, pp. 61—63. (См. также: F. E. M a l l a r d. Traité de cristallographie géometrique et physique. 1879, t. I, p. 84); см. также примечания И. И. Шафрановского к кн.: Р. Ж. Г а ю и. Структура кристаллов. Избр. тр. Изд. АН СССР, М.—Л., 1962. (Сер. «Классики науки»).

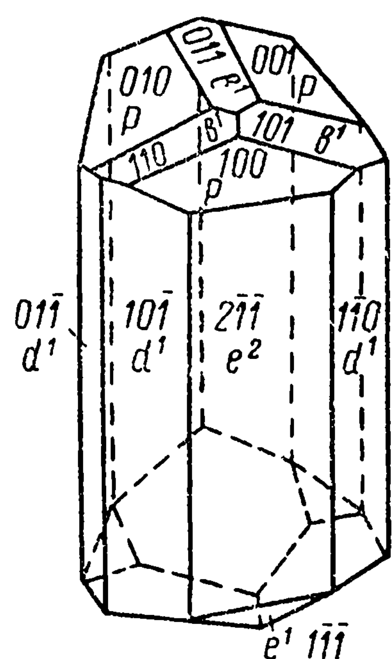


Рис. 1. Турмалин.

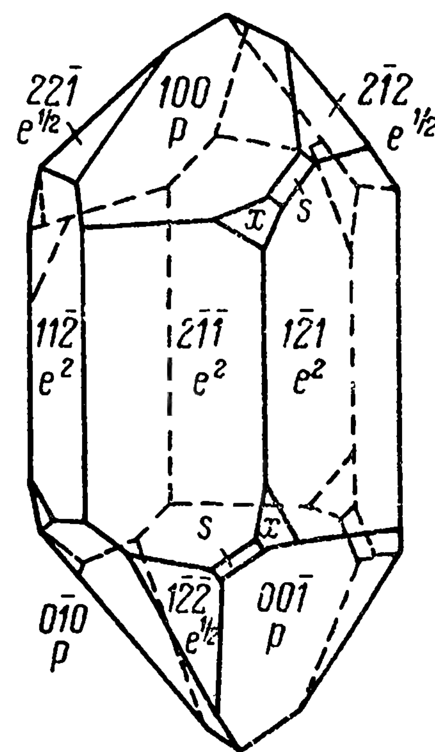


Рис. 2. Кварц.

На прилагаемых здесь рисунках изображены кристаллы турмалина и кварца с обозначениями граней в системах Гаюи—Леви и Миллера.

[3] J. M. G a u g a i n, Ann. de chim. et de phys., 57, 5, 1859.

III

[1] Впервые напечатано: C. r., 92, 186, 1881.

[2] Из своих измерений Гоген (см. прим. [3] к статье II) вывел следующие законы пироэлектричества: количество выделяющегося электричества зависит только от разности между начальной и конечной температурами и не зависит от скорости, с которой происходит изменение температуры; при перестановке начальной и конечной температур знаки выделяющихся зарядов изменяются на обратные; при небольших изменениях температуры величина выделяющихся зарядов пропорциональна изменению температуры; величина зарядов не зависит от длины кристалла турмалина и прямо пропорциональна его поперечному сечению.

IV

[1] Впервые напечатано: C. r., 92, 350, 1881.

[2] См.: J. M. G a u g a i n, Ann. de chim. et de phys., (IV), 6, 41, 1865.

[3] W. T h o m s o n. В кн.: Nicols Encyclopedia of Physical Science. Ed. 2. 1860; Phil. Mag., (V), 5, 26, 1878; см. также: Math. and Phys. Papers, 1, 315, 1882.

V

[1] Впервые напечатано: С. r., 93, 204, 1881.

[2] 1 даниель=1.23 в.

[3] Теперь это называют пьезоэлектрическая постоянная, или пьезоэлектрический коэффициент.

[4] В. Фохт пояснил это следующим образом:

«Если емкость электрометра, подводящих проводов и обкладок кристалла равна C_0, то заряд e_0, образующийся на каждой из обкладок, создает потенциал V, определяемый равенством

$$e_0 C_0 = V. \tag{1}$$

При введении известной емкости (эталона емкости) C необходим другой заряд e, чтобы получить тот же потенциал

$$e(C + C_0) = V. \tag{2}$$

Согласно наблюдениям братьев Кюри, образующиеся заряды пропорциональны полному давлению, т. е. если они возникают благодаря грузу G, то $e=KG$, где K — специфическая постоянная кристалла. Далее известно, что

$$V \text{ (1 даниель)} = 1.23 \text{ в} = 1.23 \cdot 10^8 \text{ CGSE}.$$

Из обоих уравнений (1) и (2) можно определить неизвестную емкость C_0 и пьезоэлектрический параметр K. Для последнего получаем

$$K = \frac{V}{C}\left(\frac{1}{G} - \frac{1}{G_0}\right). \tag{3}$$

Таким путем братья Кюри получили значение K, беря в качестве единицы веса килограмм и единицы потенциала CGSE: для турмалина K=0.0531, для кварца K=0.062». (W. Voigt. Lehrbuch der Kristallphysik. Leipzig, 1912, SS. 804—805).

VI

[1] Впервые напечатано: С. r., 93, 1137, 1881.

[2] Г. Липпман в указанной статье показал, что, зная некоторые электрические явления, можно вывести существование других явлений, обратных первым, пользуясь для этого законом сохранения энергии. Приводим рассуждения Липпмана, следуя Пелла в его «Курсе электричества» (J. S. Pellat. Cours d'electricité, t. I, pp. 313, 1901). Рассматривается пластинка пьезоэлектрического кристалла, параллельные грани которой перпендикулярны электрической оси кристалла. Эти грани покрыты металлическими листками, образующими обкладки плоского конденсатора. Растягивая или сжимая пластинку с силой F (положительной при растяжении), получаем на обкладках выделение зарядов. Исходя из принципа сохранения свободных электрических зарядов, Липпман предположил, что увеличение de заряда на пластинках при обратимом изотермическом процессе можно представить в виде полного дифференциала

$$de = a\,dV + b\,dF, \tag{1}$$

где V — разность потенциалов на обкладках, которую вместе с силой F можно рассматривать как независимые переменные. Тогда

$$\frac{\partial a}{\partial F} = \frac{\partial b}{\partial V}. \tag{2}$$

При бесконечно малом изменении F и V толщина l пластинки испытывает увеличение dl, которое выражается формулой

$$dl = \frac{\partial l}{\partial F} dF + \frac{\partial l}{\partial V} dV. \qquad (3)$$

В том случае, когда пластинка есть пьезоэлектрический кристалл, второй член этого выражения, соответствующий изменению толщины пластинки при изменении потенциала, при постоянном F и при постоянной температуре, не может быть равен нулю. Чтобы это показать, напишем выражение для работы dw, совершаемой при увеличении заряда обкладок на величину de и при растяжении пластинки на величину dl в виде

$$dW = Vde + Fdl. \qquad (4)$$

Заменяя здесь de и dl их выражениями из (1) и (3), получаем

$$dW = \left(Va + F\frac{\partial l}{\partial V}\right) dV + \left(Vb + F\frac{\partial l}{\partial F}\right) dF. \qquad (5)$$

Если процесс происходит обратимо и изотермически, то dV есть полный дифференциал, и тогда

$$\frac{\partial}{\partial F}\left(Va + F\frac{\partial l}{\partial V} = \frac{\partial}{\partial V}\left(Vb + F\frac{\partial l}{\partial F}\right). \qquad (6)$$

Отсюда, принимая во внимание уравнение (2), получаем

$$\frac{\partial l}{\partial V} = b. \qquad (7)$$

В случае пьезоэлектрического кристалла величина b не равна нулю, поэтому из (7) следует, что $\frac{\partial l}{\partial V}$ отлично от нуля, т. е. при постоянной температуре и при постоянном растяжении кристалла в направлении его электрической оси его линейные размеры в этом направлении должны изменяться в зависимости от разности потенциалов на противоположных гранях кристаллической пластинки. Это доказывает существование обратного пьезоэлектрического эффекта. Удлинение или сжатие пластинки зависит от знака величины b.

[3] Электрофорная машина Гольца, которой пользовались братья Кюри здесь и в последующих опытах, представляет собой наиболее распространенный вид электрофорных машин, описанный в большинстве учебников физики. Подробно описаны в курсе О. Д. Хвольсона (Курс физики, т. IV, гл. II, § 16) (см.: W. H o l t z, Pogg. Ann., **126**, 157, 1865; **127**, 320, 1865; **130**, 287, 1867; **136**, 171, 1869; **139**, 513,1870;**156**, 627, 1875).

[4] Здесь Ж. и П. Кюри описывают предварительные опыты качественного характера по обнаружению обратного продольного пьезоэлектрического эффекта, предсказанного Липпманом. Более подробное описание опытов см. стр. 30.

VII

[1] Впервые напечатано: C. r., **95**, 914, 1882.

[2] Имеется в виду работа Байя «Измерение потенциала, соответствующего определенным пробиваемым расстояниям» (J. B a i l l e, Ann. de chim. et phys., **25**, 486, 1882; J. de phys., **1**, 169, 1882).

VIII

[1] Впервые напечатано: J. de phys., (II), 8, 149, 1889.

[2] Здесь Ж. и П. Кюри впервые называют открытое ими явление «явлением пьезоэлектричества». Термин «пьезоэлектричество», по-видимому, впервые введен Ханкелем в работе «Об актино- и пьезоэлектрических свойствах кварца и их отношению к термоэлектрическим свойствам (W. Hankel, Abhandl. königl. Sächs. Ges. d. Wissensch. zu Lpz., 12, 457—548, 1883; Wied. Ann., 17, 163—1881; Lpz. Math., Phys. Ber., 33, 52—63, 1881).

[3] «Первый случай» соответствует прямому и обратному продольному явлению пьезоэлектричества.

[4] «Третий случай» соответствует прямому и обратному поперечному явлению пьезоэлектричества.

[5] В. Фохт в своей монографии (W. Voigt. Lehrbuch der Krystallphysik. Leipzig, 1912) на стр. 904—906 подробно рассмотрел описанный здесь братьями Кюри способ наблюдения продольного обратного явления пьезоэлектричества. Фохт, в частности, учел указанные здесь Ж. и П. Кюри упругие постоянные кварца и неизбежное в этом опыте расширение кварцевых пластин. Он получил довольно сложные формулы, на основании которых пришел к заключению, что с помощью указанной установки братьев Кюри трудно достичь безупречной количественной проверки теории.

[6] Современные пьезоэлектрические устройства для измерения давления описаны в книге: W. Gohlke. Einführung in die piezoelektrische Messtechnik. 2 Aufl., Leipzig, 1959.

[7] Имеется в виду работа Вертгейма «О хроматической поляризации, производимой сжатыми стеклами» (W. Wertheim, C. r., 32, 289, 1851; Pogg. Ann., 86, 321, 1882).

[8] Теорию кварцевой бипластинки дал В. Фохт (W. Voigt. Lehrbuch der Krystallphysik. Leipzig, 1912, pp. 906—910).

IX

[1] Впервые напечатано: Bull. de la Soc. minéral. de France, 7, 89, 1884.

[2] Имеется в виду мемуар А. Бравэ «О многогранниках симметричной формы» (A. Bravais, J. de math. pure et appl., 14, 141, 1849; см. также: A. Bravais. Etudes cristallographique. Paris, 1866, p. XIX. Нем. пер.: Ostwald's Klassiker, № 17, 1890).

[3] Индифферентные перемещения (déplacements indifférents) эквивалентны тому, что называют также перемещениями, или операциями совмещения (нем.: Deckbewegung, или Deckoperation).

[4] П. Кюри различает повторяемость и симметрию, что соответствует различию операций совмещения первого рода и второго рода.

[5] Здесь и дальше П. Кюри, говоря о точках, прямых и осях, разделяет их на таковые «одного и того же рода» и «разного рода». Поясним это различие на примере осей (см.: E. Mallard. Traité de cristallographie géometrique et physique. Paris, 1879, p. 41). В системе, обладающей q осями 2-го порядка, лежащими в одной плоскости, всегда имеется ось симметрии Λ порядка q, перпендикулярная этой плоскости. Углы между осями 2-го порядка равны $\frac{\pi}{q}$; поворот на угол $\frac{2\pi}{q}$ приводит к совмещению осей через одну. Если q есть нечетное число, то после q таких последовательных поворотов некоторая произвольная ось L_1 2-го порядка будет совмещена только с одним из двух взаимно противоположных направлений, исходящих из центра на каждой из других (q—1) осей 2-го порядка, т. е. ось L_1 будет совмещена с каждой такой осью 2-го порядка. В таких случаях говорят, что это оси одного и того же рода. Пример: равносторонняя трехгранная призма (рис. 1) с тремя осями 2-го порядка A_1B_1, A_2B_2 и A_3B_3, проходящими через перпендикулярную им ось L_3, две стороны которых неодинаковы. При повороте на угол $\frac{2\pi}{3}$ каждая ось совмещается с каждой другой осью.

Если же q — четное число, то ось L_1 при повороте вокруг оси A совмещается с каждым из двух противоположных направлений только половины общего числа осей. Мы имеем в этом случае оси 2-го порядка двух родов. Пример: квадратная призма с осями 2-го порядка A_1A_1' и A_2A_2' одного рода и осями B_1B_1' и B_2B_2' другого рода (рис. 2).

[6] Можно полагать, что здесь идет речь о цветке розе.

[7] Вывод формулы (2) см. в указанном выше (прим. [5]) курсе кристаллографии Маллара (т. 1, стр. 48—51); а также: G. F r i e d e l. Leçons de cristallographie. Paris, 1926, p. 42.

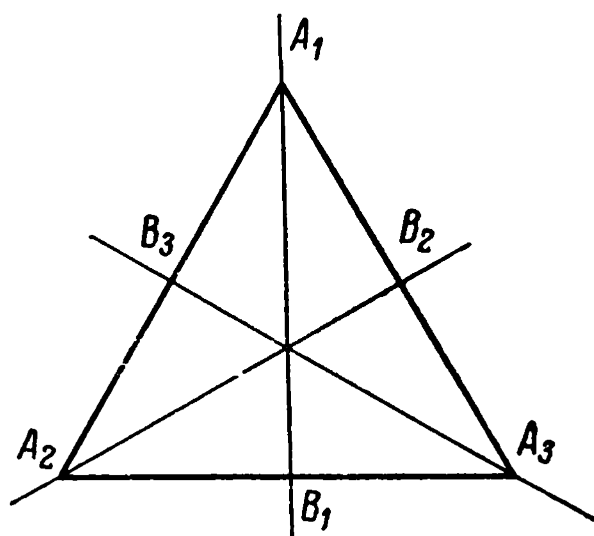


Рис. 1.

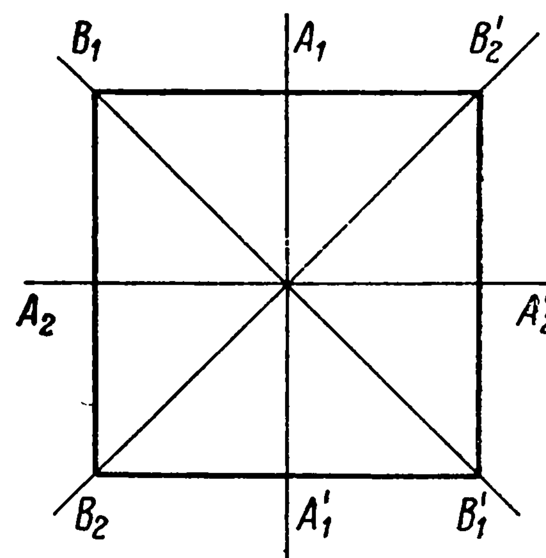


Рис. 2.

[8] См. мемуар А. Бравэ «Мемуар о многогранниках симметричной формы», теорема XLII (A. B r a v a i s, J. de math. pure et appl., 14, 141, 1849).

[9] См. прим. [7].

[10] Доказательство этого утверждения дано Малларом при доказательстве формулы (2); см. прим. [7].

X

[1] Впервые напечатано: Bull. de la Soc. minéral. de France, 7, 418, 1884.

[2] То, что здесь П. Кюри называет симметрическими преобразованиями, мы теперь называем симметрическими преобразованиями второго рода.

[3] Или, другими словами, два последовательных преобразования второго рода эквивалентны некоторому симметрическому преобразованию первого рода.

[4] Термином п л о с к о с т ь п е р е м е ж а ю щ е й с я с и м м е т р и и мы перевели название «plan de symétrie alterne», которое Пьер Кюри дал элементу симметрии, теперь обычно называемому зеркальной осью, и который Е. С. Федоров называл с л о ж н о й с и м м е т р и е й. Г. В. Вульф в книге «Кристаллы, их образование, вид и строение (Изд. 2. М., 1926) переводил это название Кюри словами «симметрия с перемежающейся плоскостью». Шенфлис называл его о с ь с и м м е т р и и в т о р о г о р о д а.

В рецензии на книгу Соре (Ch. S o r e t. Eléments de cristallographie physique. Genève — Paris, 1893) в журнале: Arch. Sci. phys. et natur. ((III), 29, 337, 18) Пьер Кюри писал: «Я показал, что симметрия всякой системы полностью определена, если известны ее плоскости обычной симметрии и другие особые плоскости симметрии, для которых я предложил название п л о с к о с т и п е р е м е ж а ю щ е й с я с и м м е т р и и.

«Плоскость перемежающейся симметрии вообще перпендикулярна некоторой оси, и, чтобы возвратить кристалл в первоначальный вид путем симметричного преобразования, надо взять изображение этого кристалла относительно этой плоскости и затем повернуть это изображение вокруг оси. Угол, на который надо сделать поворот, равен половине наименьшего угла поворота, дающего восстановление первоначального вида, вокруг этой оси.

«Правда, включение этих плоскостей перемежающейся симметрии, вообще говоря, не необходимо. Плоскости симметрии вместе с рассмотрением центра симметрии вообще

достаточны для определения симметрии кристаллической формы. Вводя же понятие плоскости перемежающейся симметрии, только получают некоторое платоническое удовлетворение от возможности перечислить все симметричные преобразования, которые восстанавливают систему в прежнем виде; число этих преобразований тогда равно числу различных поворотов, которые также могут осуществить это восстановление системы.

«Однако имеется особый случай, когда эта плоскость перемежающейся симметрии оказывается неизбежной в кристаллографии: этот случай соответствует квадратичной тетратоэдрической форме, которая отвечает символу OC, Λ_2, OL, OL', $O\Pi$, OP, OP' (см. книгу Ш. Соре, стр. 108). Эта форма возможна, хотя она еще пока не обнаружена среди кристаллических тел, она симметрична, хотя не имеет ни центра, ни плоскости симметрии. Она обладает только осью 2-го порядка (выводимой из оси 4-го порядка голоэдрической формы) и плоскостью перемежающейся симметрии, перпендикулярной этой оси 2-го порядка. Чтобы восстановить кристалл путем симметричного преобразования, необходимо взять его изображение относительно этой плоскости и повернуть затем на 90° вокруг оси. Я узнал только из книги Соре, что Бравэ уже указывал на этот очень частный случай (см.: A. Bravais. Etudes cristallographiques. Paris, 1886, p. 229; P. Curis, Bull. de la Soc. mineral. de France, 7, 418, 1884)».

[5] На следующих страницах этой работы П. Кюри дает свою классификацию групп симметрии (точечные группы). Чтобы облегчить сравнение ее с ныне принятыми классификациями, приведем здесь таблицу сопоставления обозначений кристаллических классов П. Кюри с системой обозначений А. Шенфлиса, столь привычную физикам, и с международной системой.

Системы кристаллов	Обозначения кристаллографических классов		
	П. Кюри	А. Шенфлис	международная система
Триклинная.	IX, 1	C_1	1
	IX, 3	$C_i = S_2$	$\bar{1}$
Моноклинная.	VI, 1, $q=2$	C_2	2
	IX, 2	C_s	m
	VI, 2, $q=2$	C_{2h}	$2/m$
Ромбическая.	V, 1, $q=2$	$D_2 = V$	222
	VI, 4, $q=2$	C_{2v}	$mm2$
	V, 2, $q=2$	V_h	mmm
Тетрагональная.	VI, 1, $q=4$	C_4	4
	VI, 3, $q=2$	S_4	$\bar{4}$
	VI, 2, $q=4$	C_{4h}	$4/m$
	V, 1, $q=4$	D_4	422
	VI, 4, $q=4$	C_{4v}	$4mm$
	V, 3, $q=2$	$D_{2d} = V_d$	$\bar{4}2m$
	V, 2, $q=4$	D_{4h}	$4/mmm$
Тригональная.	VI, 1, $q=3$	C_3	3
	VI, 3, $q=3$	C_{3i}	$\bar{3}$
	V, 1, $q=3$	D_3	32
	VI, 4, $q=3$	C_{3v}	$3m$
	V, 3, $q=3$	D_{3d}	$\bar{3}m$

Системы кристаллов	Обозначения кристаллографических классов		
	П. Кюри	А. Шенфлис	международная система
Гексагональная.	VI, 1, $q=6$	C_6	6
	VI, 2, $q=3$	C_{3h}	$\bar{6}$
	VI, 2, $q=6$	C_{6h}	$6/m$
	V, 1, $q=6$	D_6	622
	VI, 4, $q=6$	C_{6v}	$6mm$
	V, 2, $q=3$	D_{3h}	$\bar{6}m2$
	V, 2, $q=6$	D_{6h}	$6/mmm$
Кубическая.	IV, 1	T	23
	IV, 2	T_h	$m3$
	III, 1	O	43
	IV, 3	T_d	$\bar{4}3m$
	III, 2	O_h	$m3m$

[6] Об этих обозначениях см. прим. [2] к статье II.

[7] Вспомним, что статья написана в 1884 г., а работы Федорова и Шенфлиса, в которых именно и изучена симметрия неограниченных кристаллических сред, появились лишь через шесть лет.

XI

[1] Впервые напечатано: J. de phys., (III), 3, 393, 1894.

[2] E. Mallard. Traité de cristallographie géometrique et physique, t. I, 1879; t. II, 1884. Второй том этого труда целиком посвящен физической кристаллографии. Th. Liebisch. 1) Physikalische Kristallographie. Leipzig, 1891; 2) Grundriss der physikalische Kristallographie. Leipzig, 1896; Ch. Soret. Eléments de cristallographie physique. Geneve—Paris, 1893.

[3] См. прим. [4] к статье X.

[4] «Явление Дютера» — явление электрострикции в твердых изотропных диэлектриках, впервые наблюденное Э. Дютером и заключающееся в неодинаковом расширении диэлектрика вдоль и поперек направления силовых линий поля (E. Duter, C. r., 87, 828, 960, 1036, 1878; 88, 1260, 1879; J. de phys., 8, 82, 1879). Это явление затем наблюдал Г. Квинке (G. Quincke, Ann. der Phys. u. Chem., **10**, 165, 1880; **19**, 573, 1883). Тщательное изучение его провели А. Вюлльнер и М. Вин (A. Wüllner, M. Wien, Ann. der Phys., 9, 1217, 1902).

[5] G. Wiedemann, Pogg. Ann., **103**, 571, 1858; **106**, 161, 1859.

[6] G. Stokes, Cambr. and Dubl. Math. J., 6, 215, 1851; J. Boussinesq, J. de Liouville, **14**, 265, 1869; B. Minnigerode, Neue Jahrb. f. Mineralogie, 1886.

[7] «Вращательные коэффициенты» — недиагональные компоненты симметричного тензора теплопроводности в анизотропных телах.

[8] Имеется в виду работа Л. Больцманна «К теории электромагнитного явления, открытого Холлом» (L. Boltzmann, Sitzungsber. Akad. Wiss., Wien, **94**, Abt. II, 644, 1887).

XII

[1] Впервые напечатано: Bull. de la Soc. mineral. de France, 8, 145, 1885.

[2] Работа Гаусса по капиллярности: K. F. Gauss. Principia generalia Theoriae Figurae Fluidorum in Statu Aequilibrii. Göttingen, 1830; см. также: K. F. Gauss, Werke, V, 29, Göttingen, 1867.

[3] О теории Кюри о росте кристаллов и о критике этой теории см. главу III книги: H. E. Buckley. Crystal growth. N. Y.—London, 1951; русск. пер.: Г. Бакли. Рост кристаллов. М., 1954.

XIII

[1] Впервые напечатано: Ann. de chim. et de phys., (VII), 5, 289, 1895.

Эта статья объединяет ряд предварительных сообщений П. Кюри по исследованию магнитных свойств тел при разных температурах (см. в библиографии трудов П. Кюри в наст. изд. работы №№ 25, 27, 28, 31, 32, 35 и 36).

[2] Здесь и дальше П. Кюри называет слабомагнитными телами те, которые мы теперь называем парамагнитными.

[3] «Магнетизм», т. е. ферро- или парамагнетизм.

[4] H. A. Rowland, Phil. Mag., 48, 321, 1874.

[5] H. Becquerel, Ann. de chim. et de phys., (III), 28, 283, 1850.

[6] М. Фарадей. Экспериментальные исследования по электричеству, т. III. Изд. АН СССР, М.—Л., 1959 (Сер. «Классики науки»), стр. 47—50, 683—686.

[7] По примеру П. Кюри воду часто применяли и в качестве эталонного вещества для калибровки приборов, служащих для измерения магнитной восприимчивости, а также в качестве растворителя, поэтому измерению восприимчивости воды посвящено много работ. Теперь ее принимают равной

$$[-0.72145 \pm 0.00048 - (0.000108)\,(t^0 - 20)] \cdot 10^{-6}.$$

(См.: П. Селвуд. Магнетохимия. ИЛ, М., 1958, стр. 98—100). Чтобы сравнить результаты новых измерений с результатами, полученными П. Кюри, надо умножить числа, им приводимые, на

$$\frac{0.72}{0.79} = 0.91.$$

[8] К изучению магнитных свойств сурьмы Кюри больше не возвращался. Восприимчивость сурьмы, так же как висмута и теллура, зависит от температуры. У сурьмы при низких температурах почти до 100° восприимчивость остается почти постоянной, а затем при повышении температуры уменьшается (см.: K. Honda, Ann. der Phys., 32, 1027, 1910; G. Owen, Ann. der Phys., 37, 657, 1912).

[9] Особенности магнитных свойств висмута, так же как и особенности его электрических свойств, сделали висмут объектом весьма многочисленных исследований. Обзор см.: A. N. Gerritsen, Nederl. Tijdschr. Naturkunde, 10, 160, 1943.

[10] Обратная пропорциональность магнитной восприимчивости и абсолютной температуры, установленная здесь Кюри в случае кислорода и подтвержденная им в последующих исследованиях с другими парамагнитными веществами, представляет собой открытие весьма большого значения. Эту зависимость магнитной восприимчивости парамагнитных тел K от абсолютной температуры T называют теперь законом Кюри, а постоянную C в законе $K = \frac{C}{T}$ — постоянной Кюри.

Как известно, П. Ланжевен дал простой термодинамический, а затем и статистический выводы этого закона. (P. Langevin, Ann. de chim. et de phys., (VIII), 5, 70—127, 1905; сокращенное изложение см.: J. de phys., (IV), 4, 678—693, 1905; русск. пер.: П. Ланжевен, Избранные работы, Изд. АН СССР, М., 1960 (Сер. «Классики науки»).

[11] Магнитные свойства кислорода были предметом многочисленных исследований. Интерес к кислороду вызван был разными обстоятельствами: молекулярный кислород представляет собой парамагнитный газ, тогда как атомы кислорода диамагнитны; газообразный кислород был использован для проверки теории Ланжевена; интерес вызывало также сопоставление магнитных свойств со строением электронной оболочки молекулы кислорода.

[12] «Температуру магнитного превращения» мы теперь называем «точкой Кюри». Кюри отмечает здесь, что эта температура не может быть установлена вполне точно. В связи с этой неопределенностью в настоящее время область перехода от ферромагнетизма к парамагнетизму ограничивают двумя точками Кюри: ферромагнитной и парамагнитной, между которыми промежуток достигает иногда 10—15°.

XIV

[1] Впервые напечатано: C. r., **127**, 175, 1898.

[2] Мария Кюри (урожденная Склодовская — Sklodowska, 1867—1934) родилась в Варшаве в семье педагога. Блестяще окончила среднюю школу в 1883 г., до своего отъезда в Париж зарабатывала уроками. В 1891 г. приехала в Париж и прошла курс математики, физики и химии в Сорбонне. В 1893 г. получила степень лиценциата по физике и в 1894 г. — по математике. Она была оставлена при Сорбонне в лаборатории Липпмана. Здесь она познакомилась с Пьером Кюри и в 1895 г. стала его женой, с этого же времени она стала работать вместе с П. Кюри в Школе промышленной физики и химии. С 1896 г. — в Нормальной школе для женщин. С 1897 г. начались ее исследования радиоактивности. В 1898 г. открыла радиоактивность тория и вместе с П. Кюри открыла полоний и радий. В 1902 г. после 45 месяцев кропотливой работы получила дециграмм хлористого радия и определила атомный вес последнего. В 1903 г. защитила диссертацию «Исследование радиоактивных веществ». В том же году вместе с П. Кюри и А. Беккерелем получила Нобелевскую премию по физике. В 1906 г. после смерти П. Кюри заменила его на кафедре физики Факультета наук Парижского университета. В 1910 г. вместе с Дебьерном получила металлический радий. В том же 1910 г. опубликовала свой известный курс «Радиоактивность». В 1911 г. получила Нобелевскую премию по химии. В 1914 г. возглавила лабораторию радия в организованном в Париже Институте радия. Во время первой мировой войны организовала радиологическую службу в госпиталях.

XV

[1] Впервые напечатано: C. r., **127**, 1215, 1898.

[2] Ж. Бемонт (G. Bèmont) — начальник работ в Школе промышленной физики и химии. Данные о его жизни остались нам неизвестны.

[3] A. Demarçay, C. r., **127**, 1218, 1898.

XVI

[1] Впервые напечатано: C. r., **129**, 714, 1899.

[2] Это первое упоминание об открытии явления наведенной радиоактивности.

[3] П. и М. Кюри здесь отвергают не предположение о наведенной радиоактивности как об активном осадке в том понимании этого последнего, как это позже объяснил Э. Резерфорд, исходя из теории радиоактивного распада, а как о процессе передачи активности окружающим телам в результате перегонки самого исходного радиоактивного вещества на окружающие тела (дистилляции или возгонки).

Здесь П. и М. Кюри вводят термин «наведенной», или «индуцированной», радиоактивности. Хотя они не предлагают никакой гипотезы о механизме процесса этой наведенной радиоактивности, но из самого названия, которое они дали открытому ими явлению, явствует, что они предполагали существование какого-то процесса индукции

с помощью которого радий способен сообщить окружающим веществам свойство самим стать радиоактивными.

Позже, когда появилась гипотеза Резерфорда об эманациях и продуктах их распада, давшая иное, «вещественное», представление о явлении наведенной радиоактивности, П. и М. Кюри видели в ней малообоснованное предположение и, избегая делать сами какие-либо гипотезы, на самом деле, по существу, придерживались точки зрения, предполагающей существование в этом явлении некоторого индукционного действия, и только очень постепенно и с некоторым сопротивлением мало-помалу склонялись к представлениям об активных осадках. См. последующие работы П. Кюри.

XVII

[1] Впервые напечатано: C. r., **129**, 823, 1899.

XVIII

[1] Впервые напечатано: C. r., **130**, 73, 1900.

[2] Здесь П. Кюри называет неотклоняемыми лучами ту часть лучей радия, которую мы теперь называем α-лучами. Хотя магнитное отклонение α-лучей было обнаружено Резерфордом еще в 1899 г. (Philos. Mag., 45, 116, 1899), но их истинная природа была определена позже. В первые годы исследования радиоактивности главное внимание было обращено на β-лучи в силу их большой проникающей способности. Магнитные поля, которые были достаточны для того, чтобы создавать значительные отклонения β-лучей, не производили сколько-нибудь заметного влияния на α-лучи. В этом причина применения названий «отклоняемые» и «неотклоняемые» лучи, которыми в этой статье и в следующих П. Кюри пользуется для обозначения α- и β-лучей.

[3] Полоний испускает только α-лучи с длиной пробега в воздухе 3.8 см. В последней фразе мы имеем указание на одинаковость пробега α-частиц полония в воздухе.

XIX

[1] Впервые напечатано: C. r., **130**, 647, 1900.

[2] См. прим. [2] к статье XVIII.

XX

[1] Впервые напечатано: J. de phys., (IV), **1**, 13, 1902.

[2] С а н ь я к Ж о р ж (Sagnac George Mare Marie, 1869—1928). Ассистент по физике Парижского университета с 1894 г. С 1900 г. профессор физики в Лилле. Автор известного интерференционного опыта, относящегося к явлениям в движущихся телах (опыт Саньяка 1913 г.). В первые годы после открытия рентгеновских лучей много занимался так называемыми «вторичными рентгеновскими лучами» (см. прим. [3]).

[3] «Вторичные рентгеновские лучи» — лучи, рассеиваемые веществом, облучаемым «первичными» лучами. Начиная с 1897 г. ими много занимался Ж. Саньяк, который, по-видимому, ввел и самое название «вторичные лучи». Помимо ряда статей, Саньяк посвятил им монографию (G. S a g n a c. L'Optique des rayons X et des rayons secondaire, qui en derivant». Paris, 1900) и обзорную статью (см.: Phys. Zs., 7, 41, 1906). Было замечено, что если облучаемое вещество содержит в своем составе тяжелые элементы (Pt, Pb и др.), то «вторичное излучение» поглощается слабее, чем первичное, и, кроме того, в состав этого излучения входит некоторая доля излучения, которой не было в первичном возбуждаемом излучении. В этом случае «вторичное излучение» получается не в результате простого рассеяния, а, как говорил Саньяк, в результате некоторой «трансформации» рентгеновских лучей.

В рассматриваемой совместной работе Ж. Саньяк и П. Кюри показали, что при «трансформации» рентгеновских лучей от тяжелых металлов (свинец, платина, олово,

цинк) «вторичное излучение» несет с собой отрицательные заряды. Теперь известно, что в этих случаях мы имеем явление фотоэлектричества, вызываемого рентгеновскими лучами.

XXI

[1] Впервые напечатано: Rapports présentés au Congrès international de Physique (Paris), 3, 79, 1900. Это обзорный доклад М. и П. Кюри на Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 г., излагающий состояние исследований радиоактивности к тому времени.

[2] См. обзор А. Беккереля «Излучение урана; различные физические свойства излучения радиоактивных тел», доложенный на том же Международном физическом конгрессе в Париже в 1900 г. (H. Becquerel, Rapports).

[3] Позже, имея дело с более чистым хлористым радием, Мария Кюри получила для атомного веса радия число 225 (C. r., **135**, 161, 1902). В 1907 г., работая со значительно бо́льшим количеством радия, она же получила значение 226.4 (C. r., **145**, 422, 1907). В настоящее время атомный вес радия определен числом 226.

[4] См. прим. [2] к статье XVIII.

[5] P. Villard, C. r., **130**, 1010, 1178, 1900. Это было первым указанием на σ-лучи, испускаемые радием. Результат был подтвержден в том же году А. Беккерелем (C. r., **130**, 1154, 1900).

XXII

[1] Впервые напечатано: C. r., **132**, 548, 1901.

[2] Дебьерн Андре (Debierne André, 1874—1949). Французский химик. Ученик Школы промышленной физики и химии; там же стал профессором и директором; позже получил кафедру в Сорбонне. После смерти М. Кюри стал директором Института радия. Вместе с Марией Кюри получил чистый радий. В 1900 г. открыл актиний. Исследовал атомные веса эманаций. В последние годы жизни занимался определением влияния атомных взрывов на метеорологические явления.

XXIII

[1] Впервые напечатано: C. r., **132**, 768, 1901.

XXIV

[1] Впервые напечатано: C. r., **132**, 1289, 1901.

[2] Беккерель Анри. (Becquerel Antoine Henri, 1852—1908). Занимал кафедру в Музее естественной истории. С 1895 г. профессор физики Политехнической школы. Сперва занимался оптикой (магнитное вращение плоскости поляризации), фосфоресценцией (тушение инфракрасными лучами, фосфороскоп). В 1896 г. открыл явление радиоактивности, за которое получил в 1903 г. Нобелевскую премию. Провел многочисленные исследования по радиоактивности (отклонение α- и β-частиц, свечение под действием радиоактивных лучей и др.). Его дед Антуан Сезар Беккерель (1788—1878) был профессором Музея естественной истории, известен своими работами по электричеству и электрохимии. Отец его Эдмонд Беккерель (1820—1891) наследовал своему отцу в Музее естественной истории, позже — профессор Консерватории искусств и ремесел; известен своими работами по фосфоресценции сульфидов и соединений урана. Его сын Жан Беккерель (1878—1953), представляющий четвертое поколение этой семьи физиков, известен своими работами по парамагнитному вращению плоскости поляризации солями редких земель и др., а также работами о полосах поглощения кристаллов при низких температурах в магнитном поле.

XXV

[1] Впервые напечатано: C. r., **133**, 276, 1901.

XXVI

[1] Впервые напечатано: C. r., **133**, 931, 1901.

XXVII

[1] Впервые напечатано: C. r., **134**, 85, 1902.

[2] H. Becquerel, C. r., **133**, 977, 1901. — В этой статье Беккерель высказал одну гипотезу, которой, по его словам, он руководствовался при своих исследованиях. Он считал радиоактивное вещество состоящим из отрицательно и положительно заряженных частей. Первые имеют массу около $^1/_{1000}$ массы атома водорода, а последние — массу в 1000 раз большую. Отрицательно заряженные частицы вылетают с большой скоростью, образуя β-частицы. Положительные же частицы вылетают с малой скоростью и представляют собой частицы некоторого газа, осаждающегося на поверхностях окружающих тел. Они затем распадаются и дают начало последующего радиоактивного излучения, составляющего наведенную активность.

[3] Описанные здесь случаи изменения активности солей радия под влиянием температуры и последующего ее восстановления объясняются различием испарения отдельных составляющих активных осадков.

[4] О теории атомной трансформации Беккереля см. прим. [2] к этой статье. Перрен в статье, упоминаемой П. и М. Кюри, предполагал, что атомы построены из частиц подобно миниатюрным планетным системам. В атомах радиоактивных элементов эти частицы находятся относительно далеко от центра атома и способны преодолеть притяжение этого центра и покинуть пределы атома, образуя радиоактивное излучение.

XXVIII

[1] Впервые напечатано: C. r., **134**, 420, 1902.

[2] В этой работе Пьером Кюри был получен важный для своего времени результат, что жидкие диэлектрики подобно газам под действием лучей радия становятся проводящими и что получаемый ток может достигать насыщения подобно обычным ионизационным токам в газах; таким образом, в жидкостях, как и в газах, лучи радия создают ионы. После этой работы П. Кюри последовал ряд работ других исследователей по изучению проводимости жидких и твердых диэлектриков под влиянием лучей радия.

XXIX

[1] Впервые напечатано: C. r., **135**, 857, 1902.

[2] Здесь П. Кюри определяет время распада активного осадка, образующегося под влиянием солей радия. Для времени полураспада он нашел значение ~0.5 часа. Активный осадок, создаваемый RaEm, состоит из RaA, RaB и RaC. Здесь RaA испускает α-лучи, и его постоянная времени равна 3 мин.; RaB испускает β- и γ-лучи, его период полураспада равен 27 мин.; RaC испускает α-, β- и γ-лучи с периодом полураспада 19.5 мин. Наблюдение П. Кюри спадания активности соответствует подвижному равновесию между RaC и RaB (см.: М. Кюри. Радиоактивность, §§ 53 и 62. Физматгиз, М., 1960).

[3] Здесь и дальше «дезактивацией» П. Кюри называет самопроизвольное спадание наведенной радиоактивности. В настоящее время под «дезактивацией» обычно понимают нечто другое, а именно процесс очистки предметов от радиоактивных веществ.

[4] Во втором опыте П. Кюри наблюдал спадание активности эманации радия и нашел для ее периода полураспада (см. стр. 275) значение 3 дня 23 ч. 42 м., т. е. 3.99 дня.

Период полураспада эманации радия был предметом многочисленных измерений. Первое ее измерение было проведено Пьером Кюри и описано в настоящей статье. Оно было основано на измерении β-излучения активного осадка, создаваемого эманацией и находящегося в подвижном равновесии с эманацией (см.: М. Кюри. Радиоактивность, § 44. Физматгиз, М., 1960).

В следующем году Резерфорд и Содди (E. Rutherford, Fr. Soddy, Phil. Mag., 5, 445, 1903) иным методом, основанным на измерении спада α-излучения эманации, нашли для периода полураспада эманации значение 3.71 дня. По методу Пьера Кюри в 1910 г. М. Кюри (см.: M. Curie, Le Radium, 7, 33, 1910) повторила его измерение в опытах, продолжавшихся 30—40 дней, и нашла для периода полураспада 3.865 дня.

В 1911 г. Резерфорд вновь тщательно определил эту величину по γ-излучению, наблюдая спадание активности в промежутке времени продолжительностью более 100 дней, и нашел 3.845 дня.

Новейшие точные измерения этой величины дали 3.833 дня (см.: М. Кюри. Радиоактивность, стр. 147).

XXX

[1] Впервые напечатано: Bull des séances de la Soc. franç. de phys., 60, 1902.

XXXI

[1] Впервые напечатано: C. r., **136**, 223, 1903.

[2] Спектр эманации впервые был наблюден Рамзаем и Колли в 1904 г. (W. Ramsay, Collie, Proc. Roy. Soc., A **73**, 470, 1904).

XXXII

[1] Впервые напечатано: C. r., **136**, 364, 1903.

[2] Данн Ж. По-видимому, его второе имя Гастон. Известен Данн Гастон (Danne Gaston, 1885—1926). Физик, ученик Пьера Кюри. Посвятил свою деятельность лечению рака с помощью радиоактивного излучения. Читал лекции по радиобиологии в университете в Генте (Бельгия) и руководил лабораторией по изучению радиоактивных веществ в Жиф-сюр-Иветт. Скончался в результате неосторожного обращения с радием.

[3] В первом случае мы имеем спадание активности, обусловленное распадом активных осадков, во втором случае — распадом эманации.

[4] См. также: E. Rutherford, miss Brooks, Phil. Mag., 4, 1, 1902.

XXXIII

[1] Впервые напечатано: C. r., **136**, 673, 1903.

[2] Лаборд А. (A. Labord). Биографические данные о нем нам остались неизвестны.

[3] Выделение теплоты солями радия есть вторичный эффект; количество выделяемой теплоты есть мера энергии всех родов излучения (α-, β- и γ-)радия, поглощенных затем этими солями и окружающими телами, перешедшей в теплоту.

[4] Это громадное количество энергии, выделяемое непрерывно солями радия, почти не сопровождаемое какими-либо видимыми изменениями, происходящими с са-

мими солями, произвело в свое время очень большое впечатление и вызвало целый ряд дальнейших работ в этом же направлении и породило целый ряд гипотез для его объяснения.

«Впечатление, которое произвела заметка Кюри, было исключительно велико. В некрологе, напечатанном в «Nature» после смерти Кюри, вспоминается предсказание, что будущее человечество примет за начало своей эры открытие в марте 1903 г. Пьером Кюри теплоты, выделяемой радием» (А. Ф. Иоффе. Пьер Кюри. Усп. физ. наук, 58, вып. 4, 573, 1956).

XXXIV

[1] Впервые напечатано: C. r., 136, 1314, 1903.

[2] В те годы, к которым относится эта работа П. Кюри и Ж. Дана, появился ряд работ по определению коэффициента диффузии эманации радия в разных газах. Интерес к такого рода измерениям был обусловлен тем, что это был один из способов установления существования у эманации свойств обычного газа (этот вопрос как раз и интересовал П. Кюри), а кроме того, таким путем можно было установить атомный вес эманации. Ничтожные количества эманации не позволяли использовать для этой цели другие обычные физико-химические методы. Как здесь отмечают Кюри и Дан, количество эманации можно было оценивать по интенсивности излучения.

XXXV

[1] Впервые напечатано: J. de chim. phys., 1, 409, 1903.

[2] В конце этой обзорной статьи помещена библиография, которую П. Кюри присоединил к перепечатке этого обзора в Arch. sci. phys. et natur., Genève, 17, 241, 361, 1904.

XXXVI

[1] Впервые напечатано: C. r., 138, 190, 1904.

[2] Дьюар Джемс (Dewar James, 1842—1923). Известный английский химик и физик (родом шотландец). Профессор химии Лондонского королевского института. Изобретатель дьюаровского сосуда (1893 г.). Открыл способ достижения высокого вакуума, используя для этого поглощательную способность древесного угля (1906 г.); изобретатель взрывчатого вещества — кордит. Славу ему составили его исследования низких температур; получение жидкого (1898 г.) и твердого (1900 г.) водорода. Его работы изданы в двух томах: Dewar, sir James. The Collected Papers, 2 vol., 1927.

[3] Результат фундаментального значения, экспериментально подтверждающий заключение Резерфорда и Содди (Phil. Mag., 4, 569, 1902; 5, 441, 561, 1903) о том, что гелий порождается при распаде радиоэлементов. Тождественность α-частицы с ионизованным атомом гелия впервые была предположена Резерфордом в 1903 г. (E. Rutherford, Nature, 68, 366, 1903).

XXXVII

[1] Впервые напечатано: C. r., 138, 683, 1904.

XXXVIII

[1] Впервые напечатано: C. r., 138, 748, 1904.

[2] Вскоре после этой работы П. Кюри и Г. Данна Бронсон (Bronson, Amer. J. Sci., 20, 60, 1905; Phil. Mag., 11, 143, 1906) подтвердил предположение, что

наблюденные П. Кюри и Ж. Данном явления должны быть приписаны различию скорости испарения RaB и RaC, входящих в состав активного остатка, а отнюдь не влиянию нагревания на скорость распада этих компонент активного осадка. Температура не оказывает никакого влияния на эту скорость. Бронсон показал, что RaB испаряется значительно быстрее, чем RaC.

XXXIX

[1] Впервые напечатано: C. r., **138**, 1385, 1904.

[2] Бушар Шарль (Bouchard Charle, 1837—1915). Французский врач и биолог. Профессор патологии и общей терапии, член Института с 1887 г., президент Французского биологического общества с 1899 г., автор ряда важных работ по микробиологии и медицине.

Балтазар Виктор (Balthazard Victor, род. 1872). Французский врач. Профессор Медицинского факультета в Париже (с 1919 г.) и член Медицинской академии.

[3] Лондон Ефим Семенович (1868—1939). Известный патофизиолог и биохимик. С 1895 г. работал в Институте экспериментальной медицины в Петербурге (Ленинграде); был профессором Ленинградского университета. Одним из первых изучал биологические действия лучей радия.



СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Пьезоэлектричество

I. Образование полярного электричества под действием давления в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 9
II. О полярном электричестве в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 11
III. Законы выделения электричества в турмалине под действием давления. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 15
IV. Об электрических явлениях в турмалине и в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 17
V. Гемиэдрические кристаллы с косыми гранями как постоянные источники электричества. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 21
VI. Сжатия и расширения, производимые электрическим напряжением в гемиэдрических кристаллах с косыми гранями. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 24
VII. Электрические деформации кварца. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 27
VIII. Электрическое растяжение кварца. (Совместно с Ж. Кюри) . . . 30

Симметрия. Кристаллография

IX. О вопросах упорядоченности: повторяемость . . . 49
X. О симметрии . . . 66
XI. О симметрии в физических явлениях; симметрия электрического и магнитного полей . . . 95
XII. Об образовании кристаллов и о капиллярных постоянных их различных граней . . . 114

Магнитные свойства тел

XIII. Магнитные свойства тел при разных температурах . . . 121

Радиоактивность

XIV. О новом радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде. (Совместно с г-жой М. Кюри) . . . 199
XV. Об одном новом сильно радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной руде. (Совместно с г-жой М. Кюри и Ж. Бемоном) . . . 202
XVI. О радиоактивности, вызываемой лучами Беккереля. (Совместно с г-жой М. Кюри) . . . 205

XVII. Химические действия, производимые лучами Беккереля. (Совместно с г-жой М. Кюри) 208
XVIII. Действие магнитного поля на лучи Беккереля. Отклоняемые и неотклоняемые лучи 211
XIX. Об электрическом заряде отклоняемых лучей радия. (Совместно с г-жой М. Кюри) 214
XX. Отрицательная электризация вторичных лучей, испускаемых при трансформации X-лучей. (Совместно с Ж. Саньяком) 218
XXI. Новые радиоактивные вещества и испускаемые ими лучи. (Совместно с г-жой М. Кюри) 226
XXII. О наведенной радиоактивности, вызываемой солями радия. (Совместно с А. Дебьерном) 254
XXIII. О наведенной радиоактивности и о газах, активированных радием. (Совместно с А. Дебьерном) 257
XXIV. Физиологическое действие лучей радия. (Совместно с А. Беккерелем) 260
XXV. О радиоактивности солей радия. (Совместно с А. Дебьерном) 262
XXVI. О наведенной радиоактивности, вызываемой солями радия. (Совместно с А. Дебьерном) 265
XXVII. О радиоактивных телах. (Совместно с г-жой М. Кюри) 268
XXVIII. Проводимость жидких диэлектриков под влиянием лучей радия и лучей Рентгена 271
XXIX. О постоянной времени, характеризующей исчезновение радиоактивности, наведенной радием в закрытом сосуде 274
XXX. Об абсолютном измерении времени 277
XXXI. О наведенной радиоактивности и об эманации радия 278
XXXII. Об исчезновении радиоактивности, наведенной радием на твердые тела. (Совместно с Ж. Данном) 281
XXXIII. О теплоте, самопроизвольно выделяемой солями радия. (Совместно с А. Лабордом) 284
XXXIV. Об эманации радия и ее коэффициенте диффузии в воздухе. (Совместно с Ж. Данном) 287
XXXV. Последние исследования радиоактивности 290
XXXVI. Исследование газа, окклюдируемого и выделяемого бромистым радием. (Совместно с Дж. Дьюаром) 318
XXXVII. Об исчезновении радиоактивности, наведенной радием на твердых телах. (Совместно с Ж. Данном) 320
XXXVIII. Закон исчезновения активности, наведенной радием, после нагревания активированных тел. (Совместно с Ж. Данном) 323
XXXIX. Физиологическое действие эманации радия. (Совместно с Ш. Бушаром и В. Бальтазаром) 328

Приложение

Послесловие 333
Краткая биография П. Кюри 335
Обзор научных работ П. Кюри 342
Пьезоэлектрический кварц. (Выдержка из диссертации Ж. Кюри) 373
Библиография трудов П. Кюри 377
Примечания 382

ПЬЕР КЮРИ

Избранные труды

Утверждено к печати
Редколлегией серии «Классики науки»
Академии наук СССР

Редактор издательства *Г. М. Арон*
Технический редактор *А. В. Смирнова*
Корректоры *Л. М. Бова, Ш. А Иванова* и
Н. З. Петрова

Сдано в набор 3/IX 1965 г. Подписано к печати 26/XI 1965 г. РИСО АН СССР № 1—198В. Формат бумаги 70×90$^1/_{16}$. Бум. л. 12.5. Печ. л. 25+1 вкл. ($^1/_8$ печ. л.) = 29.39 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 25.2. Изд. № 2485. Тип. зак. № 460. Тираж 2200.
Цена 1 р. 77 к. + переплет 20 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука»
Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
265	4 снизу	260	262
274	1 »	256	257
360	15 сверху	(—252°).	(—252°) (№ 65; наст. изд., стр. 301).
385	Формула (6)	$(Va + F\frac{\partial l}{\partial V} =$	$\left(Va + F\frac{\partial l}{\partial V}\right) =$
388	18 сверху	P. Curis	P. Curie

Пьер Кюри

П. КЮРИ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

